

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh systému pasivního odvodu tepla z jaderného reaktoru
Proposal of Passive System for Heat Removal from Nuclear Reactor

Vedoucí diplomové práce:

Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Student:

Bc. Karel Lindovský

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Karel Lindovský

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2302T006 Energetické stroje a zařízení

Téma:

Návrh systému pasivního odvodu tepla z jaderného reaktoru
Proposal of Passive System for Heat Removal from Nuclear Reactor

Zásady pro vypracování:

Vyřešte a navrhnete systém pasivního odvodu zbytkového tepla z jaderného reaktoru AP 600 Westinghouse. Určete zbytkový tepelný výkon z jaderné reakce po odstavení reaktoru. Popište koncepci pasivních systémů dochlazování AP 600 a jejich funkci. Navrhnete trubkový výměník tepla na základě teorie modelování, provedte tepelný, hydraulický a pevnostní výpočet. Zadané parametry: elektrický výkon hrubý 600 MWe, tepelný výkon 1940 MWt; teplota na vstupu/výstupu aktivní zóny 279,5/315,6 °C; průtok chladiva reaktorem 9940 kg/s; tlak na výstupu z reaktoru 15,5 MPa; tlak páry na výstupu z PG 5,76 MPa; parní výkon 1063 kg/s; teplota napájecí vody 224 °C.

Seznam doporučené odborné literatury:

HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. ISBN 80-01-03190-X.

MÁTAL, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně, 2001. ISBN 80-214-2028-6.

HEZOUČKÝ, František. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. ISBN 80-01-03324-4.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**


Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015





prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc., za vedení a odbornou pedagogickou pomoc při tvorbě této práce.

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.
-

V Ostravě 18.5.2015

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Karel Lindovský

Adresa trvalého pobytu autora práce:

L. Svobody 743

742 13, Studénka

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. LINDOVSKÝ K., *Návrh systému pasivního odvodu tepla z jaderného reaktoru: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2015, 63 s, Vedoucí práce: Kolat, P.

Diplomová práce se zabývá návrhem koncepce a konstrukčním řešením systému pasivního odvodu tepla z jaderného reaktoru Westinghouse AP600. První část diplomové práce poskytuje informace o historii společnosti Westinghouse, základní parametry reaktoru AP600 a seznámení s jednotlivými okruhy jaderné elektrárny. V úvodní části diplomové práce jsou rovněž poskytnuty informace týkající se popisu funkce pasivních systému dochlazování jaderného reaktoru AP600 na havárii typu LOCA. Výpočtová část se soustřeďuje na základní tepelné, hydraulické a pevnostní výpočty pasivního havarijního výměníku tepla, podle zadaných parametrů.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

Bc. LINDOVSKÝ K., *Proposal of Passive System for Heat Removal from Nuclear Reactor: Master Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2015, 63 p, Thesis head: Kolat, P.

Master thesis is dealing with proposal conception and structural design of passive system for heat removal from nuclear reactor Westinghouse AP600. The first part of master thesis provides information about Westinghouse Electric Company, general parameters of reactor AP600 and also introduces with each several circulatory circuit of nuclear plant. The introduction part of the master thesis also provides information concerning describe the function passive cooling systems of nuclear reactor AP600 in LOCA accident. The calculation part of the master thesis deals with basic heat, hydraulic and strength calculation of passive residual heat removal heat exchanger, based given parameters.

OBSAH

1. ÚVOD	10
2. Historie Westinghouse Electric Company	11
3. Reaktor AP600 a jeho základní parametry.....	13
3.1 Základní parametry a koncepce	14
3.2 Primární okruh.....	15
3.2.1 Parogenerátor	17
3.2.2 Kompenzátor objemu	18
3.2.3 Hlavní cirkulační čerpadla.....	19
3.3 Sekundární a terciální okruh.....	20
4. Systémy pasivní bezpečnosti.....	22
4.1 Pasivní systém chlazení kontejmentu.....	22
4.2 Systém zajišťující provozuschopnost dispečinku.....	24
4.3 Izolace a bezpečnost kontejmentu.....	24
4.4 Pasivní systém chlazení aktivní zóny.....	25
5. Systémy aktivní bezpečnosti	28
6. Určení zbytkového tepelného výkonu z jaderné reakce po odstavení reaktoru	29
7. Tepelný výpočet PRHR HX.....	32
7.1 Stanovení výkonu výměníku a parametrů chlazeného media	33
7.2 Stanovení parametrů chladicí vody v bazénu IRWST.....	35
7.3 Iterace.....	38
7.4 Iterace 2.....	42
8. Hydraulický výpočet.....	47

8.1	Nové potrubí.....	48
8.2	Potrubí po delším provozu.....	51
9.	Pevnostní výpočet.....	54
9.1	Výpočet minimální tloušťky stěny trubky	54
9.2	Pevnostní výpočet trubkovnice	57
10.	Závěr	59
11.	Seznam použité literatury.....	60
12.	Přílohy	63

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Značka	Veličina	Jednotka
S	Průtočná plocha výměníku	[m ²]
w	Rychlost proudění	[m·s ⁻¹]
Q	Tepelný výkon výměníku	[W]
Re	Reynoldsovo kritérium	[1]
Gr	Grasshofovo kritérium	[1]
Pr	Prandtlovo kritérium	[1]
Nu	Nusselotovo kritérium	[1]
α	Součinitel přestupu tepla	[W·m ² ·K ⁻¹]
Δt	Střední logaritmický teplotní spád	[°C]
t _{d1}	Teplota na vnitřní straně stěny trubky	[°C]
t _{d2}	Teplota na vnější straně stěny trubky	[°C]
β	Součinitel objemové roztažnosti	[K ⁻¹]
λ	Součinitel tepelné vodivosti	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
λ_t	Součinitel tření	[1]
ν	Kinematická viskozita	[m ² ·s ⁻¹]
ρ	Hustota	[kg·m ⁻³]
q _l	Lineární součinitel tepelného toku	[W·m ⁻¹]
k _l	Lineární součinitel prostupu tepla	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
L	Celková délka trubek	[m]
N	Počet trubek	[1]
Δp_{zm}	Místní tlaková ztráta	[Pa]

Δp_{zt}	Tlaková ztráta třením	[Pa]
Δp_c	Celková tlaková ztráta	[Pa]
e	Tloušťka stěny trubky	[m]
d_1	Vnitřní průměr trubky	[m]
d_2	Vnější průměr trubky	[m]
P	Tlak vody v primárním okruhu	[Pa]
Θ	Součinitel rozložení trubek	[1]
ξ	Ztrátový součinitel místního odporu	[1]
f	dovolené namáhání materiálu	[Pa]
R	Poloměr zakřivení	[m]
s_{pr}	Tloušťka trubkovnice	[m]
t_r	Rozteč trubek	[m]
Δ	Součinitel drsnosti	[m]

1. ÚVOD

Jaderná energetika je v současnosti jeden z nejperspektivnějších způsobů získávání elektrické energie a zajištění energetických potřeb společnosti. Česká republika má díky své geografické poloze velmi malou možnost využití přírodních zdrojů k transformaci na elektrickou energii. Naše klimatické podmínky nejsou příliš vhodné k využití solární energie, nemáme ani příliš možností k využití energie vodní a produkce biomasy omezuje zemědělskou produkci. Nabízí se řešení v podobě uhelných a plynových elektráren, ale zásoby těchto surovin jsou omezené, navíc na našem území poměrně málo zastoupené a především jsou významným zdrojem uhlovodíků pro chemický průmysl. Možností, jak tyto zdroje nahradit, je jaderná energetika. Jaderná energetika využívá energii vázanou v jádrech atomů pomocí štěpení těžkých jader na jádra lehčí, za uvolňování obrovského množství tepelné energie, a následně její transformaci v elektrický proud.

Velkou výhodou jaderných elektráren je jejich spolehlivost, malý objem spotřebovaného paliva, relativně malé provozní náklady, velké zásoby paliva a celkové snížení emisí oxidu uhličitého. Naproti tomu nevýhodou jsou nákladné investice na jejich postavení a údržbu, vyhořelé jaderné palivo, které zatím neumíme zpracovávat, a musíme jej ukládat v trvalých podzemních uložiscích a také rozsah škod při větší havárii v jaderné elektrárně. I přes všechna tyto úskalí má jaderná energetika slibnou budoucnost a s rozvojem znalostí a technologického pokroku bude v budoucnu zabírat stále větší místo v produkci elektrické energie.

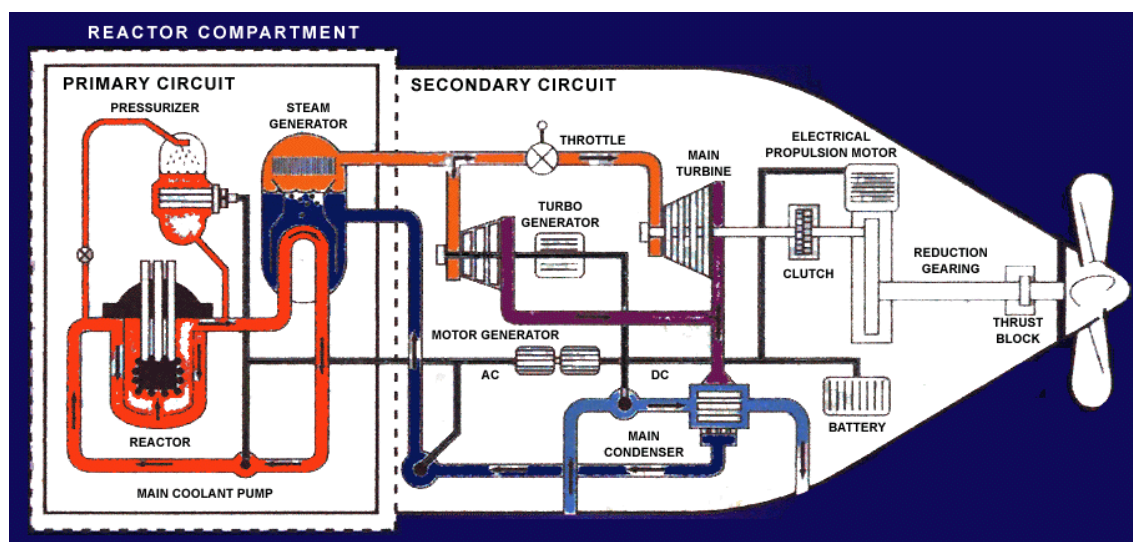
Tato diplomová práce se zabývá jaderným reaktorem Westinghouse AP600, především jeho pasivními bezpečnostními prvky a návrhem pasivního havarijního výměníku. V první části se popisují jednotlivé části jaderné elektrárny, hlavně tedy její pasivně bezpečnostní systémy a druhá část se zabývá tepelným, hydraulickým a pevnostním výpočtem havarijního výměníku.

2. HISTORIE WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY

[21,30]

Společnost Westinghouse Electric Company byla založena v roce 1886 a za jejím zrozením stál George Westinghouse. Původně se zabývala rozvodem střídavého proudu, za jehož rozšířením byl Nikola Tesla. Postupně se stala jednou z největších firem zabývajících se širokým spektrem produktů z oblasti elektřiny.

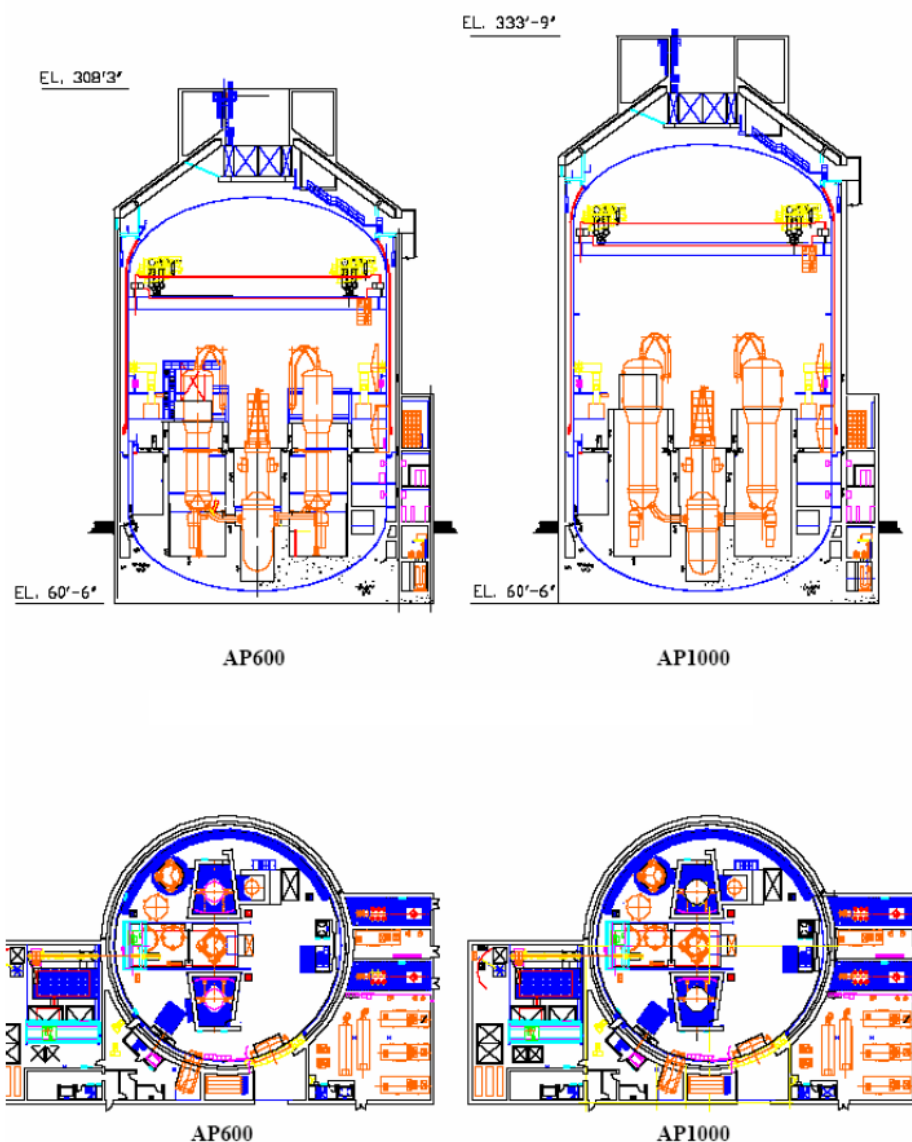
Jaderné energetice se firma věnuje od roku 1937, kdy založila své výzkumné oddělení. V roce 1954 dodala svůj jaderný reaktor S2W do americké ponorky USS Nautilus a o tři roky později postavil na světě první tlakovodní reaktor v Shippingport, v Pennsylvania. V roce 1960 dokonce modernizovanou verzi reaktoru A2W z americké ponorky USS Nautilus S2W dostala první jaderná letadlová loď USS Enterprise. Na obrázku 1.1 je znázorněno schéma pohonu jaderné ponorky USS Nautilus.



Obrázek 2.1 Schéma pohonu USS Nautilus [27]

V roce 1985 začala firma Westinghouse projektovat tlakovodní reaktor AP600. Koncept elektrárny byl hotov v roce 1989 a jeho hodnotící bezpečnostní zprávu schválila americká Jaderná regulační komise NRC v roce 1999. Ale i tak nebyl žádný tento reaktor nikdy postaven, avšak na základě projektu AP600 vznikl větší AP1000. Jedná se v podstatě o tentýž model, pouze o větším výkonu. Na obrázku 1.2 je názorně vidět podobnost AP600 a AP 1000. V současné době je realizována stavba prvních 4 bloku

v Číně v lokalitách Sanmen a Haiyang, další 4 bloky se staví v USA v lokalitách Vogtle a Virgil C. Summer. Očekává se však, že počet bude s přibývajícím časem narůstat.



Obrázek 2.2 Srovnání AP600 a AP1000 [1]

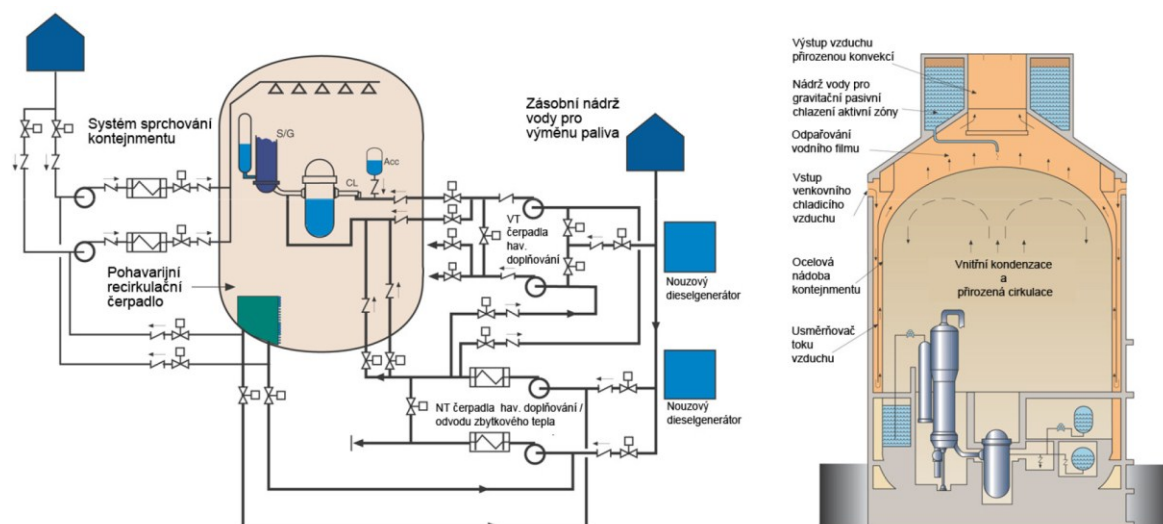
V roce 1997 se Westinghouse přejmenovala na CBS corporation a prodala svoje jaderné oddělení British Nuclear Fuels Limited (BNFL). V roce 2006 koupila Westinghouse Electric Company japonská Toshiba. V současnosti je na světě v provozu celkem 437 jaderných reaktorů o celkovém čistém instalovaném výkonu 377543MWe, z toho přibližně polovina stojí na základech technologie Westinghouse. Dnes se firma zabývá vlastním vývojem, licencováním, výstavbou jaderných reaktorů, výrobou a dodáváním jaderného paliva, servisem jaderných elektráren, a také systémy kontroly a řízení JE.

3. REAKTOR AP600 A JEHO ZÁKLADNÍ PARAMETRY

[1,13,14,15,18,28]

Reaktor AP600 je tlakovodní reaktor firmy Westinghouse, jehož primárním i sekundárním chladivem, a taktéž moderátorem je lehká voda. Dosahuje tepelného výkonu 1940 MW a elektrického výkonu 600 MW. Jedná se pouze o koncept, ale na jeho základě byl postaven větší AP1000, oba tyto reaktory patří do generace III+ a byly licencovány americkou Jadernou regulační komisí NRC.

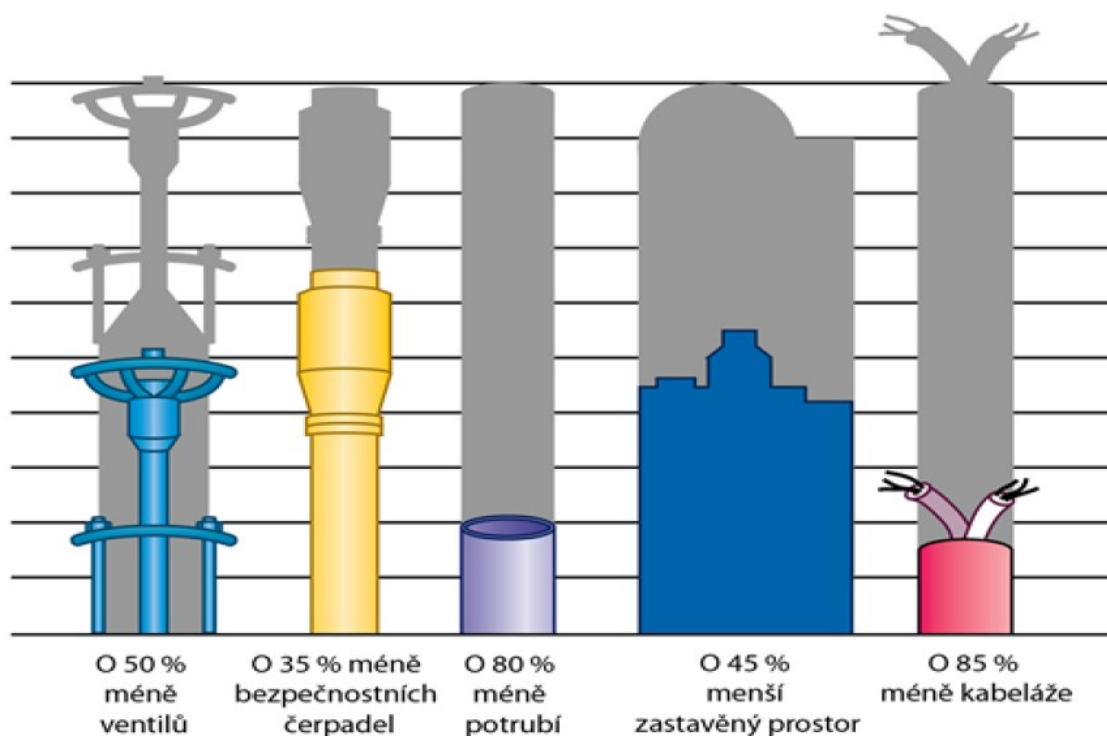
Oba tyto reaktory vynikají bezkonkurenční pasivní bezpečností, nízkými náklady na provoz a osvědčenými komponenty z 50 let trvajících zkušeností z oboru, jako jsou parogenerátory, řídicí a kontrolní systémy, palivo, kompenzátory objemu a reaktorové nádoby. Hlavním cílem tohoto projektu bylo zjednodušit systémy bezpečnosti, zrychlit samotnou stavbu a snížení počtu komponent v jaderné elektrárně. Na obrázku 2.1 můžeme vidět srovnání AP1000 a elektrárny bez pasivního zabezpečení. Jasně je vidět, že není potřeba žádných čerpadel a záložních diesel agregátů.



Obrázek 3.1 Srovnání elektrárny s aktivním a pasivním zabezpečením [28]

Největším přínosem jsou prvky pasivních bezpečnostních systémů, které dokáží bez zásahu operátora či bez potřeby elektrického proudu udržet elektrárnu v ustáleném stavu po dobu 72 hodin. Dalším přínosem je modulární výstavba, kdy se elektrárna staví jako stavebnice z už předem vyrobených jednotlivých dílů. Ty se vyrábí dopředu na několika

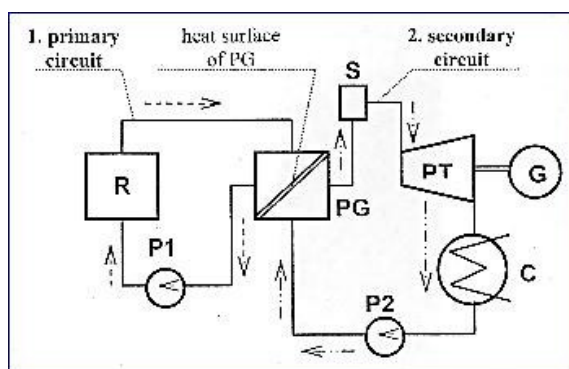
místech současně a jejich sestavování na místě probíhá paralelně, což šetří čas i peníze. Další výhodou je snížení počtu jednotlivých armatur, potrubí či kabeláže, viz obr 2.2.



Obrázek 3.2 Snížení počtu jednotlivých dílů [1]

3.1 Základní parametry a koncepce [1,15,17]

Elektrárna je koncipovaná jako dvouokruhová, tj. v primárním okruhu se pomocí tepla uvolněného při štěpné řetězové reakci v aktivní zóně jaderného reaktoru ohřeje demineralizovaná voda o vysokém tlaku a ta následně předá své teplo v parogenerátoru do sekundárního okruhu. Pára vyvinutá v parogenerátoru pohání parní turbínu, která přeměňuje energii páry na kinetickou energii rotoru turbíny. Sytá pára o vysoké teplotě expanduje v jednotlivých stupních turbíny, roztáčí její rotor, který pohání generátor, a ten generuje elektrický proud. Základní parametry jsou uvedeny v tabulce 1, schéma dvouokruhové elektrárny na obrázku 2.3.



Obrázek 3.3 Schéma dvouokruhové tlakovodní elektrárny [29]

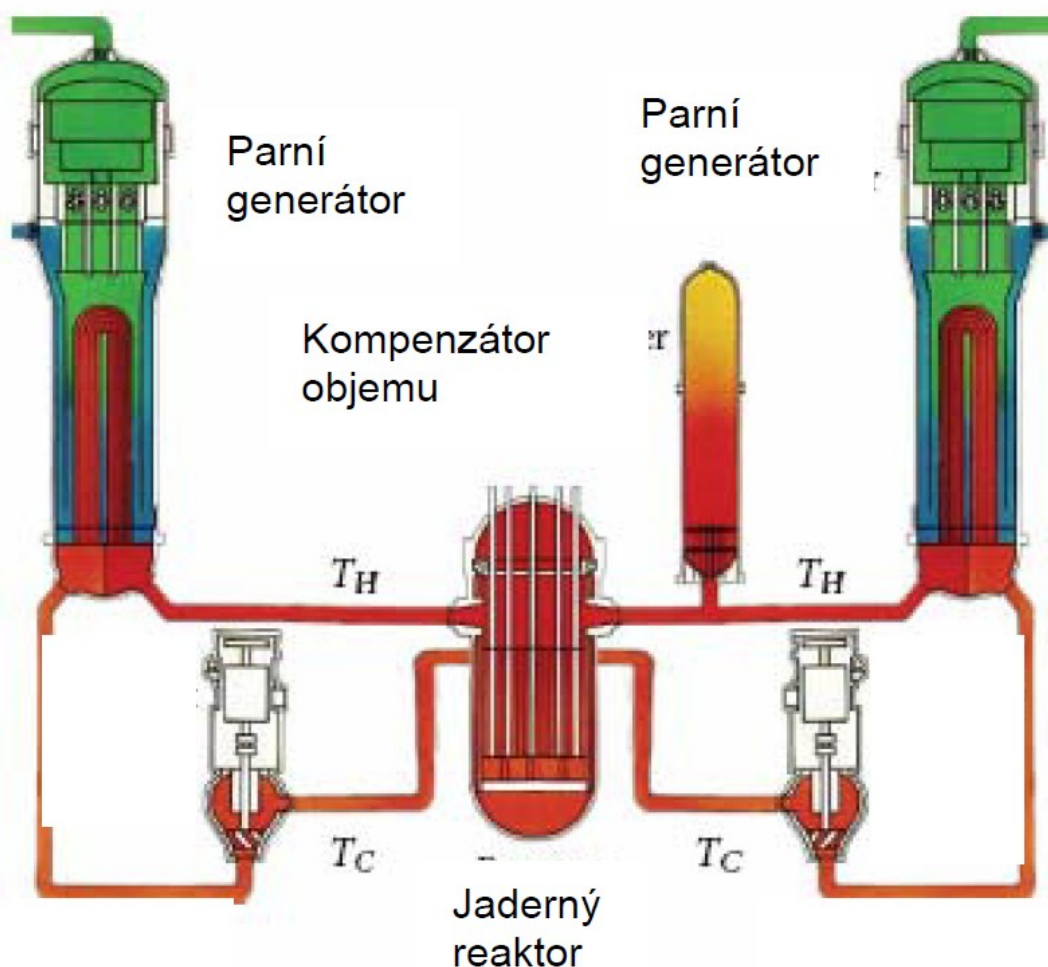
Tabulka 1 Základní parametry elektrárny

Tepelný výkon	1940 [MW _t]
Čistý elektrický výkon	600 [MW _e]
Projektovaná životnost	60 [let]
Účinnost	31 [%]
Termodynamický cyklus	Obrácený Rankinův
Chladivo	Lehká voda
Moderátor	Lehká voda
Palivo	Oxid uraničitý

3.2 Primární okruh [1,2,3,17]

Primární okruh je uzavřený systém, který se využívá na výrobu a přenos tepelné energie. Z technologického hlediska jej lze rozdělit na samotný okruh, skládající se z vlastního reaktoru, dvou parogenerátorů, kompenzátoru objemu a čtyř hlavních cirkulačních čerpadel. Každé z těchto čerpadel pohání chladicí vodu do aktivní zóny reaktoru cirkulačním potrubím. Potrubí celého primárního okruhu je tvořeno dvěma smyčkami, každá z nich má dvě studené a jednu horkou větev. Další důležitou součástí

primárního okruhu jsou pomocné a havarijní systémy. Schéma primárního okruhu je na obrázku



Obrázek 3.4 Primární okruh AP600 [1]

Přeměna energie jádra v teplo probíhá při štěpné řetězové reakci v aktivní zóně jaderného reaktoru, který je chlazen vysokotlakou demineralizovanou vodou, která rovněž slouží jako moderátor. Moderátor funguje tak, že atomy vodíku, respektive jeho jádra, obsažené v molekulách vody, při srážce s neutronem absorbují zhruba dvě třetiny jeho energie, ten v důsledku toho potom zpomalí na rychlost tepelného pohybu molekul, kdy je pravděpodobnější jeho srážka s jádrem uranu. Voda nesmí v žádném případě začít vřít, protože by způsobila tavení palivových tyčí, proto proudí o vysokém tlaku, její parametry jsou v tabulce 2.

Tabulka 2 Parametry chladicí vody primárního okruhu

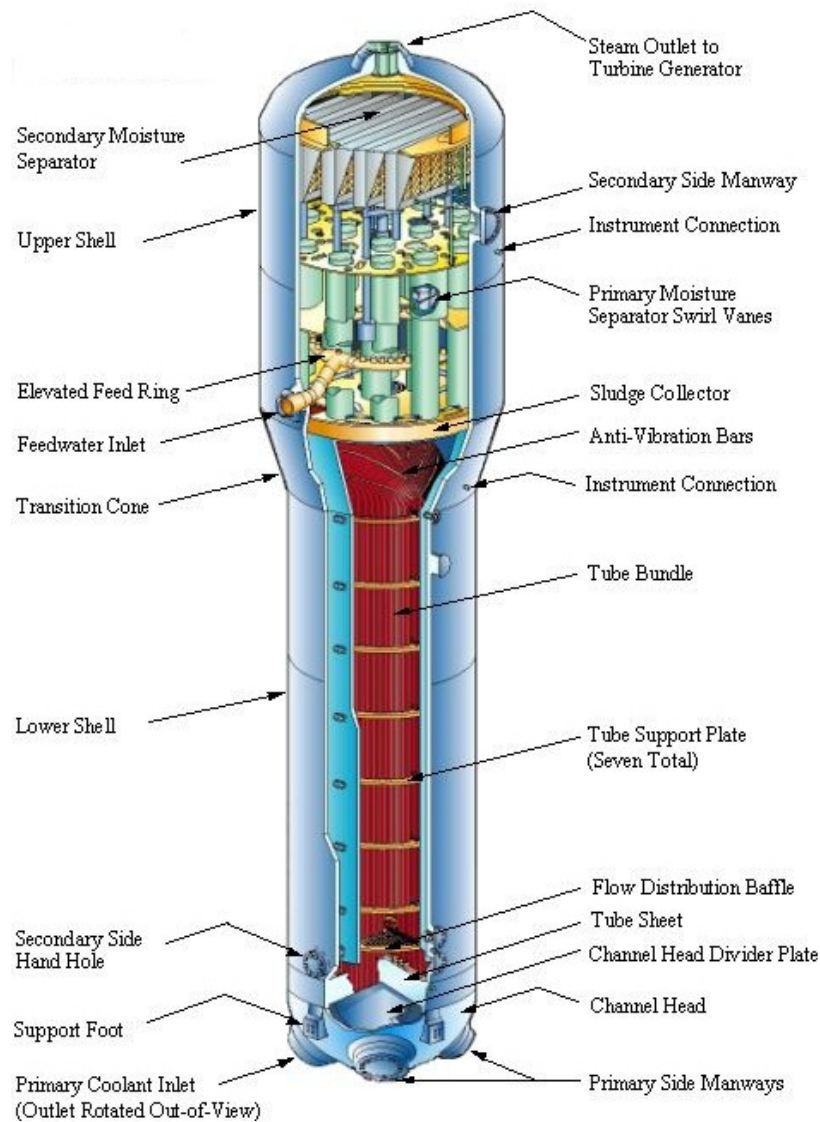
Průtok chladicí vody	9940	[kgs ⁻¹]
Tlak chladicí vody	15,513	[MPa]
Teplota na vstupu do reaktoru	279,5	[°C]
Teplota na výstupu do reaktoru	315,6	[°C]
Rozdíl teplot	36,1	[°C]

3.2.1 Parogenerátor [2,14,15,23]

Ohřátá voda proudí horkými větvemi cirkulačního okruhu do dvou parogenerátorů typu Delta - 75, kde odevzdá své teplo sekundárnímu okruhu jaderné elektrárny. Parogenerátor je horizontální výměník tepla tvořený U – trubkami, kterými proudí primární chladivo. Základní parametry parogenerátoru Delta - 75 použitého v primárním okruhu jaderné elektrárny Westinghouse AP600 jsou popsány v tabulce 3 a jeho schéma je na obrázku 2.5.

Tabulka 3 Parametry Parogenerátoru

Typ	Delta – 75, U – tube, Vertikální
Počet	2
Celková výměnná plocha	6986 [m ²]
Počet trubek	6307
Materiál trubek	Inconel 690 - TT
Vnější průměr	17,5 [mm]



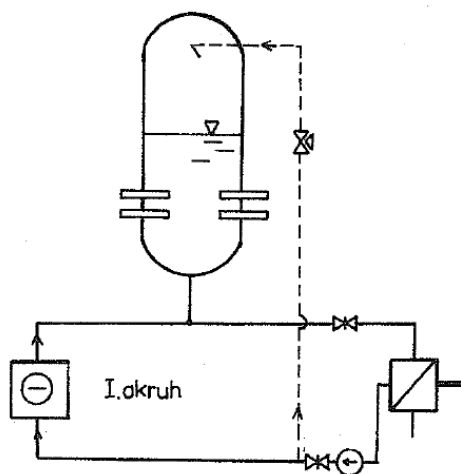
Obrázek 3.5 Parogenerátor Delta – 75 [23]

3.2.2 Kompenzátor objemu [2,14,15]

K vyrovnání změn v primárním okruhu slouží kompenzátor objemu, který je autonomním systémem, napojeným na primární okruh a vyrovnává objemové (tlakové) změny. Pracuje jako vyrovnávací nádrž, odebírající či doplňující chladivo z cirkulačního okruhu při jeho objemu vlivem tepelné dilatace. Vodní prostor kompenzátoru je napojen na jednu horkou větev. Dojde-li v primárním okruhu k poklesu tlaku, sepnou se elektrické ohříváky vody umístěné v kompenzátoru, voda v kompenzátoru začne vřít a tlak vzniklé páry dorovná tlakovou ztrátu v okruhu. Po dosažení požadovaného tlaku elektrické

ohříváky samy odstaví. Je-li zapotřebí tlak snížit, do parního prostoru se začne přes regulační ventil, napojeného potrubím na studenou větev, rozprašovat voda. Tím dojde ke snížení teploty, kondenzaci páry a snížení objemu parního polštáře, tudíž se v kompenzátoru zvedne hladina.

Kompenzátor užitý v projektu AP600 je léty odzkoušená technologie vyvinutá firmou Westinghouse, ale zde byl použit s o 30 % větším celkovým objemem než u elektráren se srovnatelným výkonem, z důvodu lepší regulace tlakovým změn. Celkový objem kompenzátoru užitého u AP600 je $45,31 \text{ m}^3$, z toho pracovní prostor parního polštáře je $14,16 \text{ m}^3$ a výkon elektrických ohříváčů je 1600 kW. Princip kompenzátoru je znázorněn na obrázku 2.6.

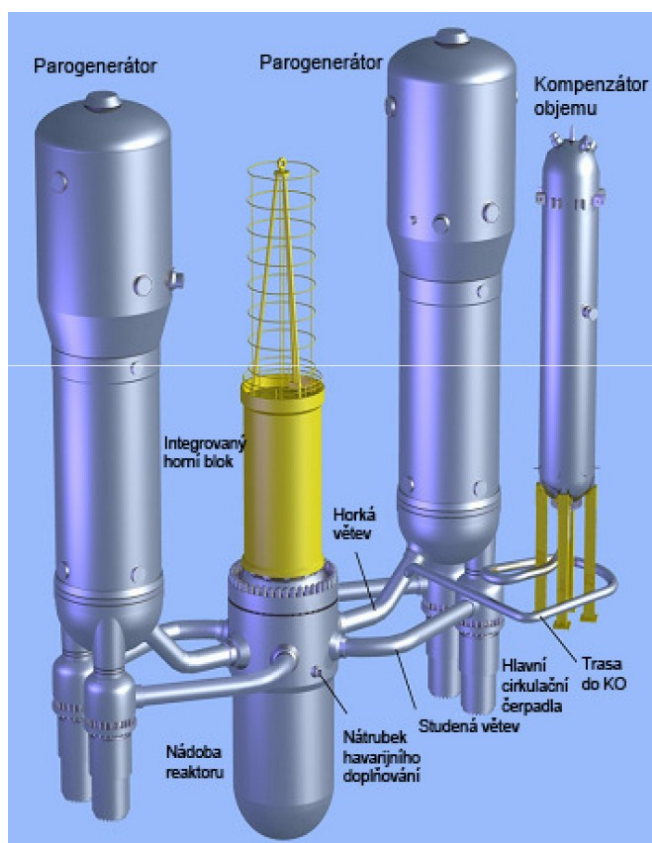


Obrázek 3.6 Princip kompenzátoru objemu [2]

3.2.3 Hlavní cirkulační čerpadla [2,14,15]

Hlavní cirkulační čerpadla jsou vysoce odolná, spolehlivá, bezúdržbová, hermeticky uzavřená zařízení, která pohánějí chladicí směs v primárním okruhu přes reaktor a parní generátory. Jedná se technologicky nejnáročnější čerpadla v jaderné elektrárně. Zatížení, kterému čelí, je způsobeno vysokým tlakem a teplotou dopravované vody a navíc i její radioaktivitou. Čerpadlo musí být velice spolehlivé, poněvadž je nutné, aby případné revize či výměny opotřebovaných částí byly prováděny pouze při odstavení reaktoru, tj. při výměně paliva.

Každá ze dvou smyček má dvě čerpadla, jejichž sání je umístěno ve spodní části parogenerátoru a výtlačk každého z nich je veden jako samostatná studená větev do aktivní zóny reaktoru. Po odebrání tepla z řetězové štěpné reakce se oteplená chladicí voda vrací společnou horkou větví do parogenerátoru, kde předá své teplo sekundárnímu okruhu jaderné elektrárny. Čerpadla mají jmenovitý průtok 2485 m³/a a výtlačnou výšku 73 m při 1800 otáčkách za minutu. Schéma zapojení primárních cirkulačních čerpadel v primárním okruhu jaderné elektrárny AP600 je na obrázku 2.7.



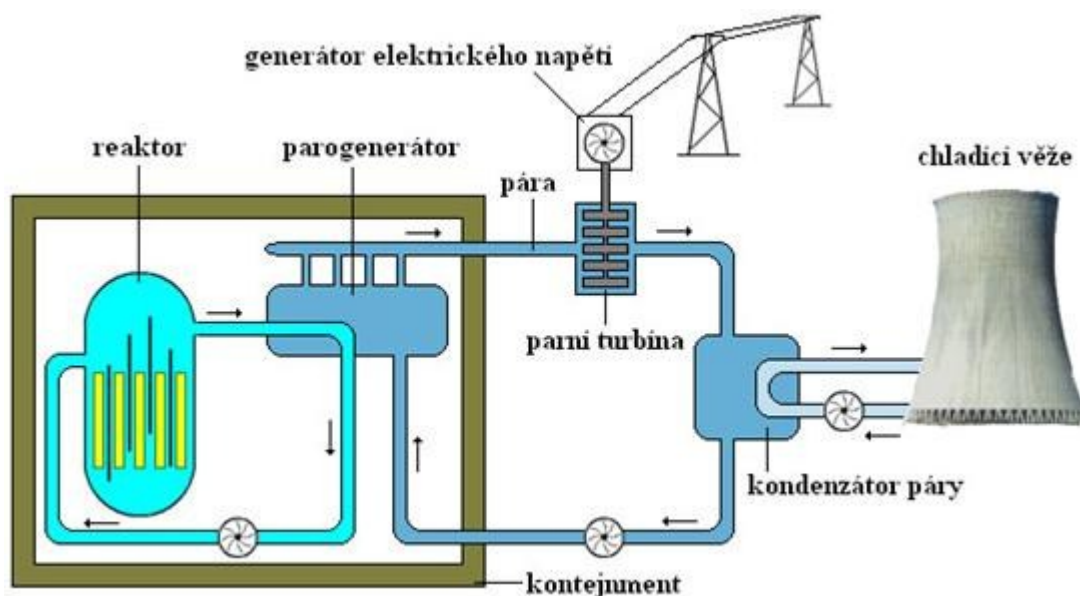
Obrázek 3.7 Schéma zapojení primárních cirkulačních čerpadel [28]

3.3 Sekundární a terciální okruh [17,26]

Sekundární okruh jaderné elektrárny odebírá teplo primárnímu okruhu v parogenerátoru. Do mezitrubkového prostoru parogenerátoru se se pomocí čerpadla dopravuje voda, která se při styku s trubkami o vysoké teplotě odpařuje, a tím odebírá

teplo primárnímu okruhu. Horká pára se poté přivádí do vysokotlaké části vícestupňové parní turbíny, kde se pomocí expanze mění tlaková energie páry v kinetickou. Ta roztáčí rotor turbíny a ten pohání generátor elektrického proudu. Po expanzi ve vysokotlaké části se pára vede do dvou nízkotlakých částí, kde expanduje na tlak v kondenzátoru.

Pára po expanzi ve vícestupňové parní turbíně vstupuje do kondenzátoru, což je výměník tepla napojený na terciální okruh jaderné elektrárny. V kondenzátoru by měl být, co největší podtlak, aby se dosáhlo co největší účinnosti. Toho dosáhneme co největším ochlazením. Chladicí voda z kondenzátoru se ochlazuje v chladicích věžích. V kondenzátoru vyexpandovaná pára kondenzuje a pomocí čerpadla se vrací do parogenerátoru. Voda přiváděná do parogenerátoru se pomocí regenerativních ohříváků, kde se ohřívá až na $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ z důvodu zvýšení termodynamické účinnosti. Na obrázku 2.8 je znázorněno zapojení sekundárního a terciálního okruhu v jaderné elektrárně.



Obrázek 3.8 Schéma jaderné elektrárny [24]

4. SYSTÉMY PASIVNÍ BEZPEČNOSTI [1,7,14,15,18]

Pod pojmem systémy pasivní bezpečnosti chápeme takové ochranné prvky reaktoru, které fungují na základě jednoduchých fyzikálních principů, jako je gravitace, kondenzace, odpařování, Pascalův zákon, přirozená konvekce a další. Pasivní systémy na rozdíl od aktivních řeší nestandardní a havarijní situace bez zásahu lidské obsluhy a bez potřeby elektrického proudu.

Mezi první pasivní bezpečnostní systémy používané už u reaktorů II. generace lze zařadit havarijní tyče držené elektromagnety, které při výpadku dodávky elektrického proudu spadnou samospádem vlivem gravitace do aktivní zóny, a štěpná řetězová reakce se postupně úplně utlumí. Dále můžeme uvést jako příklad použití hydroakumulátorů napojených na primární potrubí. Jedná se o nádrže s vodou a kyselinou boritou natlakované dusíkem, které při poklesu tlaku v primárním okruhu proudí zpětným ventilem a dorovnávají tlak.

Reaktory, které mají prvky pasivní bezpečnosti vylepšené tak, že se samy při jakékoliv nestandardní situaci odstaví a po dobu 72 hodin nepotřebují zásah operátora, označujeme jako reaktory III+ generace. Mezi ně řadíme reaktory Westinghouse AP600 a AP1000. Reaktor AP1000 je v současnosti první a jedinou pasivní elektrárnou, jež získala licenci od Americké jaderné regulační komise NRC.

Pasivní systémy bezpečnosti reaktoru AP600 tvoří především čtyři základní systémy, a to:

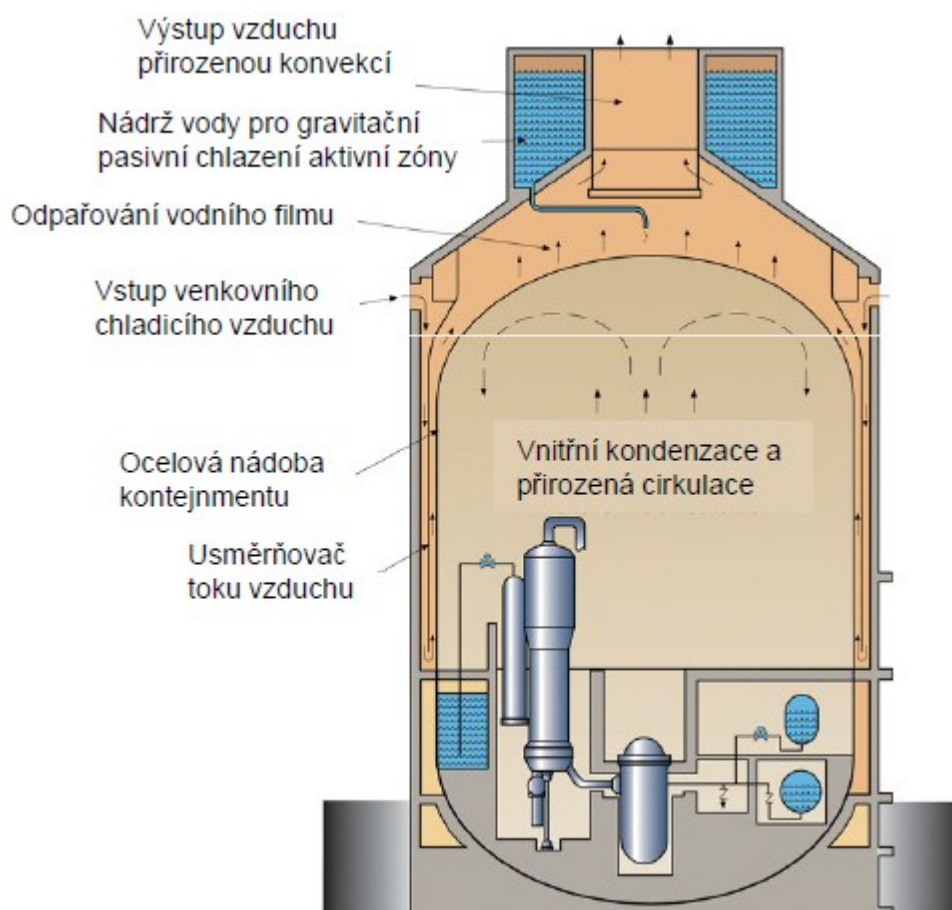
- pasivní systém chlazení kontejmentu, pomocí dvojího pláště
- izolace kontejmentu proti úniku radiace a ochrana před vnějšími vlivy
- pasivní systém chlazení aktivní zóny
- systém zajišťující provozuschopnost dispečinku v případě havárie

4.1 Pasivní systém chlazení kontejmentu [1,7,14,15,18]

Pasivní systém chlazení kontejmentu funguje na několika jednoduchých fyzikálních principech. Při havárii se uvolní velké množství tepelné energie, která pomocí přirozené konvekce a kondenzace začne zevnitř ohřívat vnitřní ocelovou nádobu kontejmentu.

Přes průduchy v horní části stěny vnějšího železobetonového kontejmentu se nasává vzduch, který přirozenou cirkulací chladí vnitřní ocelovou nádobu a odvádí teplo. Proudění vzduchu usměrňuje usměrňovač toku vzduchu, pomocí nějž vzduch nejdříve proudí dolů mezi železobetonovou stěnou vnějšího kontejmentu a přepážkou, a následně se tok obrací a proudí vzhůru mezi usměrňovačem a stěnou ocelové nádoby vnitřního kontejmentu a odvádí se komínem umístěným v horní části železobetonového kontejmentu.

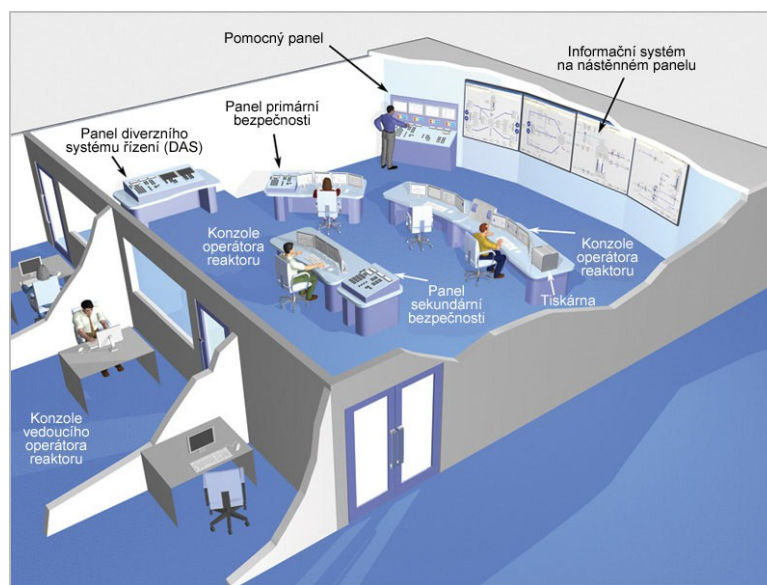
Odvod ohřátého vzduchu je zajištěn pomocí komínového efektu. Ve druhé fázi se začne z nádrže umístěné nad kontejmentem samospádem pomocí gravitace spouštět voda, která taktéž svým odpařováním ochlazuje vnitřní ocelovou nádobu kontejmentu, viz obr. 3.1. Zásoba vody vydrží na 72 hodin a v případě nutnosti je nádrž napojena na náhradní zdroj přívodu vody.



Obrázek 4.1 Pasivní systém chlazení kontejmentu [28]

4.2 Systém zajišťující provozuschopnost dispečinku [1,18]

Systém zajišťující provozuschopnost dispečinku je konstruován tak, aby při havárii na dispečinku mohlo pracovat až 11 lidí po dobu 72 hodin. To vše zajišťují sady nádob se stlačeným vzduchem napojené na hlavní i záložní potrubí přívodu vzduchu a udržují požadované větrání a tlak v místnosti dispečinku. Rozmístění jednotlivých pracovišť na dispečinku jaderné elektrárny je zobrazeno na obrázku 3.2.



Obrázek 4.2 Dispečink jaderné elektrárny [18]

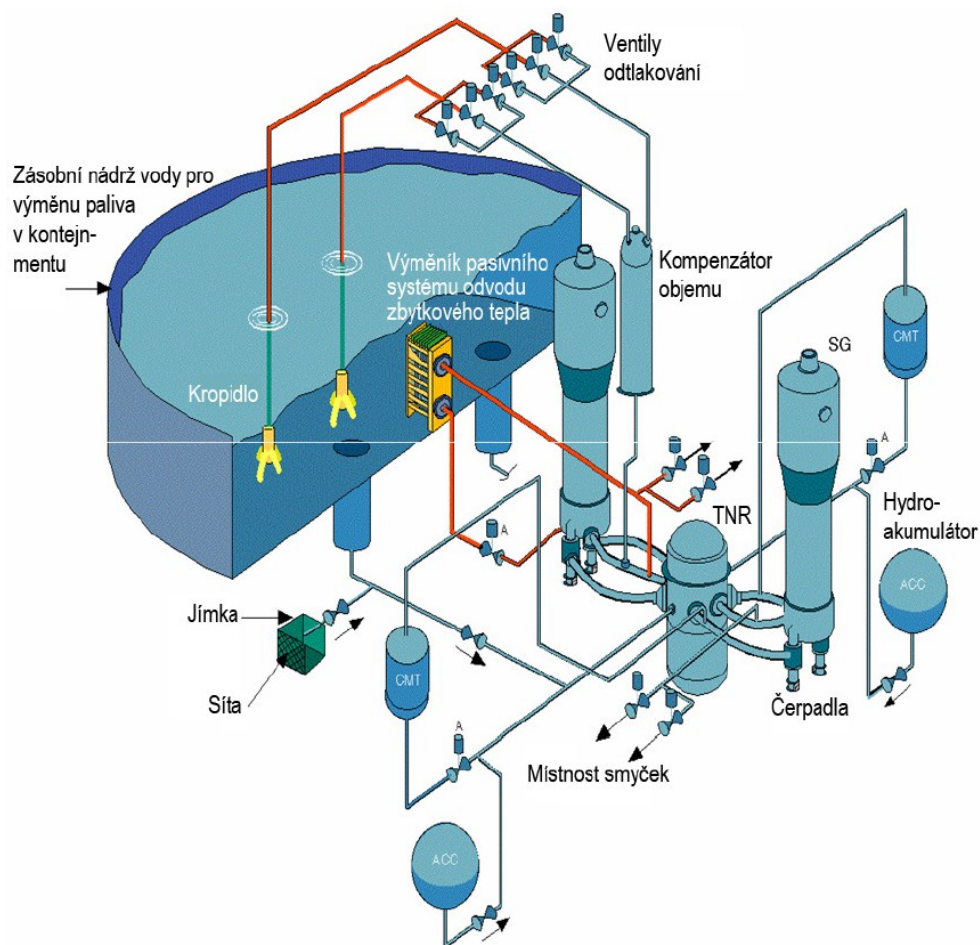
4.3 Izolace a bezpečnost kontejmentu [1,18]

Kontejnment je válcová železobetonová stavba s ocelovou tlakovou nádobou o výšce 57,6 m a průměru 39,6 m. Maximální přípustný tlak je 0,316 MPa a maximální přípustná teplota je 137,8 °C. Rychlost úniku při havárii je 0,12 % obj. za den. Kontejnment je postaven tak, aby odolal zemětřesení, pádu letadla, hurikánům, požárům a dalším vnějším vlivům, které by mohly způsobit jeho těžké poškození. Navíc musí splňovat požadavky na dokonalé utěsnění před únikem radiace při běžném provozu.

4.4 Pasivní systém chlazení aktivní zóny [1,7,14,15,18]

Pasivní systém chlazení aktivní zóny zajišťuje pomocí akumulátorů, nádrží a rezervoáru vody v kontejmentu dostatečný přívod chladiva k reaktoru, a to vše bez použití čerpadel, jen na základě přírodních fyzikálních zákonů. Taktéž zajišťuje pasivní odvod zbytkového tepla z reaktoru a jeho uchlazení.

Hlavní systémy zajišťující pasivní chlazení aktivní zóny jsou přidavné zásobní nádrže v aktivní zóně – CMT (core makeup tanks), hydroakumulátory – ACC (accumulators), pasivní výměník pro odvod zbytkového tepla – PRHR HX (Passive residual heat removal heat exchanger) a zásobní nádrž umístěná v kontejmentu používaná k uskladnění použitého paliva při jeho výměně – IRWST (In – containment refueling water storage tank), a zároveň je v ní umístěn pasivní výměník pro odvod zbytkového tepla., viz obr. 3.3. Všechny tyto systémy mají své využití například při havárii typu LOCA, tj. prasknutí větve primárního okruhu a úniku chladiva.



Obrázek 4.3 Havarijní dochlazování AP600 [28]

Při trhlině na větvi v primárním okruhu dojde v okruhu k poklesu tlaku, na který zareaguje kompenzátor objemu a pomocí plynového polštáře začne vytlačovat chladivo do okruhu, aby dorovnal tlak. Pokles hladiny v kompenzátoru objemu a zvýšení teploty chladiva uvede do chodu přídavné nádrže v aktivní zóně – CMT. Jejich studená větev se zahřeje a spustí vstřikování vody přímo do aktivní zóny. Následně dojde ke spuštění systému odvodu zbytkového tepla, kdy voda z primárního okruhu proudí do pasivního výměníku pro odvod zbytkového tepla PRHR – HX umístěného v bazénu – IRWST a následně zpět do primárního okruhu. Při určitém poklesu hladiny v nádržích v aktivní zóně CMT se aktivuje snižování tlaku a přes dekompresní ventily, jež jsou vyvedeny pod hladinu v bazénu IRWST, se začne upouštět přetlak z primárního okruhu. Při poklesu tlaku v primárním okruhu pod určitou mez se spustí hydroakumulátory, které jsou na daný tlak natlačeny pomocí dusíku. Při poklesu hladiny v nádržích v aktivní zóně na 20 % celkového objemu se aktivuje další snížení tlaku v primárním okruhu, a to upouštění přetlaku přes dekompresní ventily přímo do atmosféry kontejmentu. Aby nedošlo k přehřátí a následnému roztavení aktivní zóny, je potřeba doplnit vodu do primárního okruhu. K tomu dojde díky vypouštění vody z bazénu IRWST potrubím do aktivní zóny. Po určité době začne pára kondenzovat na stěnách a stropě kontejmentu díky vnějšímu chlazení a postupně se zachytává v jímce a bazénu IRWST, odkud opět vtéká do aktivní zóny, a tak stále dokola – vnitřní cirkulace.

Pokud by došlo k tavení aktivní zóny, okamžitě by operátor otevřel ventily umístěné v bazénu IRWST a došly by k zaplavení reaktorové šachty, která je uložena v železobetonových základech kontejmentu. Po zaplnění reaktorové šachty voda zateče za izolaci reaktoru a svým odpařováním jej začne ochlazovat. Vzniklá pára se odpustí otevřením odpouštěčů páry do atmosféry kontejmentu. Navíc je zaplaven i reaktor zevnitř, aby nedošlo k protavení aktivní zóny skrz stěny reaktoru. Na obrázku 3.4 je popis reaktorové šachty a na obrázku 3.5 je znázorněno tavení aktivní zóny a následné zaplavení reaktorové šachty.

Pokud čidla teploty na výstupu z AZ dosáhnou 1200 °F, operátor zaplaví šachtu reaktoru vypuštěním vody ze zásobní nádrže vody pro výměnu paliva v kontejneru (IRWST)

Odpouštění páry (obvykle 4 ks)

Stěna tlakové nádoby reaktoru

Šachta reaktoru

Voda z IRWST

Nádoba reaktoru

Aktivní zóna

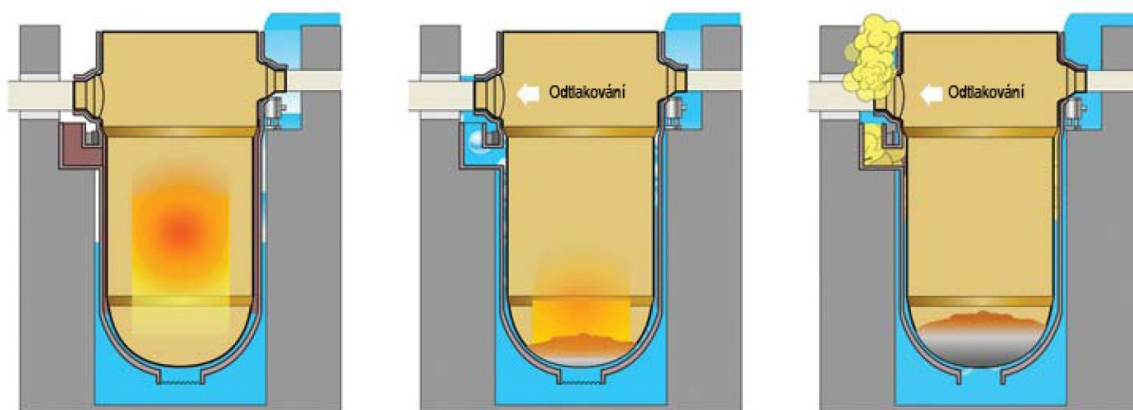
Opěrný ocelový prstenec nádoby reaktoru

Stínění

Izolace

Vstup vody

Obrázek 4.4 Popis reaktorové šachty [28]



Obrázek 4.5 Tavení aktivní zóny a následné zaplavení reaktorové šachty [28]

5. SYSTÉMY AKTIVNÍ BEZPEČNOSTI [1,18]

Tyto systémy nejsou určeny k řešení havarijních situací, ale podporují běžný provoz. Slouží jako první ochranná linie při narušení chodu elektrárny, či menších problémů. Představují další vrstvu ochrany v zabezpečení elektrárny. Dále se zasazují o nižší četnost výskytu poškození a přitom jsou sestrojeny jednoduše, aby nevyžadovaly častou údržbu a kontrolu. Jejich údržba, případně oprava se dá provádět za plného provozu a v případě výpadku elektrického proudu jsou zálohovány diesel generátory nebo bateriemi.

Mezi tyto systémy patří:

- Systém, jenž řídí chemické složení a objem
- doplňování vody do primárního okruhu
- doplňování kyseliny borité do primárního okruhu
- kontrolní a řídicí systémy pro přerušení štěpné reakce
- absorpční tyče
- pomocné systémy napájecí vody
- systém pro odvod běžného zbytkového tepla
- potlačení tlaku v kontejmentu pomocí sprchování
- měření obsahu vodíku v kontejmentu
- ventilace, klimatizace, vytápění
- přídatný systém pro počáteční napuštění napájecí vody

6. URČENÍ ZBYTKOVÉHO TEPELNÉHO VÝKONU Z JADERNÉ REAKCE PO ODSTAVENÍ REAKTORU [5]

Po odstavení reaktoru se přestane vyvíjet teplo vlivem okamžitých neutronů. Teplo se ale stále vyvíjí, a to v důsledku štěpení paliva zpožděnými neutrony a zbytkovým vývinem tepla v důsledku radioaktivního β , γ záření produktů štěpení. Vývin zpožděnými neutrony se uplatňuje pouze krátkou chvíli po odstavení reaktoru, a to po dobu zhruba 5 minut. Relativní hodnotu podílu tepla (tepelného výkonu) vyvíjeného zpožděnými neutrony N_N z ustáleného výkonu před odstavením můžeme vyjádřit následujícím vztahem:

$$N_N(\tau) = 0,93 \cdot \frac{\frac{\beta_{ef}}{\beta}}{\beta_{ef} + \rho} \cdot \sum_i \beta_i \cdot e^{-\frac{\beta \cdot \lambda_i \cdot \tau}{\rho + \beta_{ef}}} \quad (1)$$

kde: τ je doba od odstavení reaktoru

ρ je absolutní hodnota vnášené reaktivity

β , β_i , β_{ef} , λ_i jsou charakteristiky zpožděných neutronů.

Produkty štěpení, které se za dobu provozu v reaktoru nashromáždily, se neustále rozpadají a při tom uvolňují β a γ záření – zbytkový vývin tepla. V několika prvních vteřinách je zbytkový vývin tepla okolo 6-7 % provozního výkonu. Doba, po kterou se bude zbytkový vývin tepla uskutečňovat, je dána poločasem rozpadu jednotlivých atomů. Aktivita produktů štěpení se bude s postupem času snižovat, tudíž se bude snižovat i zbytkový tepelný vývin. Vztah pro určení relativního tepelného výkonu způsobeného rozpadu produktu štěpení $N_{\beta,\gamma}$ je dán vztahem:

$$N_{\beta,\gamma} = 0,0662 \cdot [\tau^{-0,2} - (T_0 + \tau)^{-0,2}] [MW_t] \quad (2)$$

kde: τ je doba od odstavení reaktoru

T_0 je doba provozu reaktoru

Celková hodnota tepelného výkonu N_{zb} je tedy součtem výkonu způsobeného zpožděnými neutrony a výkonem zapříčiněného rozpadem látek vzniklých při štěpení:

$$N_{zb} = N_0 \cdot (N_{\beta,\gamma} + N_N) [MW_t] \quad (3)$$

kde N_0 je výkon reaktoru před odstavením.

Pokud nás bude zajímat zbytkový tepelný výkon v dlouhodobém horizontu, bude jeho hodnotu určovat poločas rozpadu produktů štěpení:

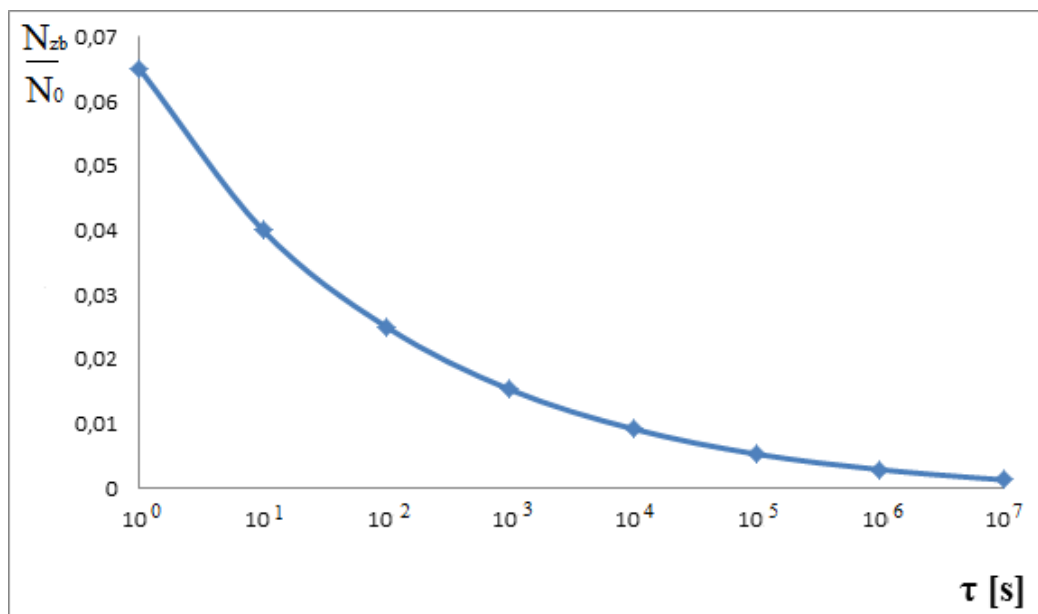
$$\frac{N_{zb}}{N_0} = 0,0662 \cdot [\tau^{-0,2} - (T_0 + \tau)^{-0,2}] [1] \quad (4)$$

V následující tabulce je zobrazena závislost poměru zbytkového tepelného výkonu a nominálního výkonu jaderné elektrárny na čase od doby odstavení reaktoru. Ihned po odstavení, tj. v čase 1 sekunda, je hodnota zbytkové výkonu 6,5 % výkonu nominálního a postupně se snižuje. Po 15 minutách už činí 1,5 % a po 116 dnech bude zbytkový výkon tepla 0,13 % hodnoty nominálního výkonu.

Tabulka 4 Poměr zbytkového výkonu k nominálnímu v závislosti na čase

τ [s]	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
$\frac{N_{zb}}{N_0} [1]$	0,065	0,040	0,025	0,0153	0,0092	0,0053	0,0029	0,0013

Grafická závislost je zobrazena na obrázku 5.1.



Obrázek 6.1 Poměr zbytkového výkonu k nominálnímu výkonu v závislosti na čase

7. TEPELNÝ VÝPOČET PRHR HX [4,9,10,11,12,15]

Pro havarijní výměník jsem zvolil trubky z materiálu Inconel 690, které mají výborné pevnostní a antikorozivní vlastnosti. Trubky jsem zvolil o vnitřním průměru 0,01016 m a tloušťce stěny 0,00127 m. Počet trubek jsem odhadl na 1745 o střední délce trubky 12,1 m. V tabulce 5 jsou uvedeny základní parametry médií, a to chladicí voda z primárního okruhu a voda v bazénu IRWST a v tabulce 6 zvolené základní parametry výměníku.

Tabulka 5 Základní parametry médií

Medium	Teplota		Hmotnostní tok
	Vstup [°C]	Výstup [°C]	\dot{m} [kg·s ⁻¹]
Chladicí voda	315,6	97,2	33,52
Voda v bazénu	48,9	-	-

Tabulka 6 Zvolené parametry výměníku

Veličina	symbol	hodnota	jednotka
Vnější průměr trubky	d_2	0,0127	[m]
Vnitřní průměr trubky	d_1	0,01016	[m]
Tloušťka stěny trubky	e	0,00127	[m]
Střední délka trubky	L	12,1	[m]
Střední délka svislé trubky	l_1	6,3	[m]
Střední délka vodorovné trubky	l_2	2,9	[m]
Počet trubek	N	1745	[1]

7.1 Stanovení výkonu výměníku a parametrů chlazeného media

Průtočná plocha výměníku

$$s = \frac{\pi \cdot d_1^2 \cdot N}{4} [m^2] \quad (5)$$

$$s = \frac{\pi \cdot 0,01016^2 \cdot 1745}{4} [m^2]$$

$$s = 0,14 [m^2]$$

Střední teplota chlazené látky

$$t_{chs1} = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{2} [^{\circ}C] \quad (6)$$

$$t_{chs1} = \frac{315,6 + 97,2}{2} [^{\circ}C]$$

$$t_{chs1} = 206,4 [^{\circ}C]$$

Fyzikální vlastnosti vody při teplotě 206,4 [°C]

$$c_p = 4,53 \cdot 10^3 [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$\lambda = 0,658 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$\nu = 0,157 \cdot 10^{-6} [m^2 \cdot s^{-1}]$$

$$\rho = 858 [kg \cdot m^{-3}]$$

$$Pr = 0,92 [1]$$

Střední teplota stěny

$$t_{s1} = \frac{t_{chs} + t_v}{2} [^{\circ}C] \quad (7)$$

$$t_{s1} = \frac{206,4 + 48,9}{2} [^{\circ}C]$$

$$t_{s1} = 127,7 [^{\circ}C]$$

Rychlost proudění v trubce

$$w = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot S} [m \cdot s^{-1}] \quad (8)$$

$$w = \frac{33,52}{858 \cdot 0,14} [m \cdot s^{-1}]$$

$$w = 0,28 [m \cdot s^{-1}]$$

Tepelný výkon výměníku

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{p1} - t_{p2}) [W] \quad (9)$$

$$Q = 33,52 \cdot 4,53 \cdot 10^3 \cdot (315,6 - 97,2) [W]$$

$$Q = 32943456 [W]$$

Výpočet Reynoldsova kritéria

$$Re = \frac{w \cdot d_1}{\nu} [1] \quad (10)$$

$$Re = \frac{0,28 \cdot 0,01016}{0,157 \cdot 10^{-6}} [1]$$

$$Re = 18119,75 [1]$$

Výpočet Nuseltova Kritéria

Pr_s – Prandtlovo kriterim pro střední teplotu stěny trubky $t_{sl} = 127,7 [^{\circ}C]$

$$Pr_s = 1,35 [1]$$

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} [1] \quad (11)$$

$$Nu = 0,021 \cdot 18119,75^{0,8} \cdot 0,92^{0,43} \cdot \left(\frac{0,92}{1,35}\right)^{0,25} [1]$$

$$Nu = 46,94 [1]$$

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_1} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (12)$$

$$\alpha_1 = \frac{46,94 \cdot 0,658}{0,01016} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$\alpha_1 = 3040,01 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

7.2 Stanovení parametrů chladící vody v bazénu IRWST

Teplota na vnější straně trubky

$$t_{d2} = \frac{t_s + t_v}{2} [^{\circ}C] \quad (13)$$

$$t_{d2} = \frac{127,7 + 48,9}{2} [^{\circ}C]$$

$$t_{d2} = 88,3 [^{\circ}C]$$

Fyzikální vlastnosti vody pro teplotu 88,3 [°C]

$$c_p = 4,21 \cdot 10^3 [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$\lambda = 0,680 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$\nu = 0,335 \cdot 10^{-6} [m^2 \cdot s^{-1}]$$

$$\rho = 966,4 [kg \cdot m^{-3}]$$

$$Pr = 2 [1]$$

$$\beta = 6,9 \cdot 10^{-4} [K^{-1}]$$

Grasshofovo kritérium

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (t_s - t_v) \cdot l_s^3}{\nu^2} [1] \quad (14)$$

$$Gr = \frac{9,81 \cdot 6,9 \cdot 10^{-4} \cdot (127,7 - 48,9) \cdot 6,3^3}{(0,335 \cdot 10^{-6})^2} [1]$$

$$Gr = 1,19 \cdot 10^{15} [1]$$

Nusseltovo kritérium

$$Nu = 0,135 \cdot (Pr \cdot Gr)^{\frac{1}{3}} [1] \quad (15)$$

$$Nu = 0,135 \cdot (2 \cdot 1,19 \cdot 10^{15})^{\frac{1}{3}} [1]$$

$$Nu = 18024,34 [1]$$

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l_s} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (16)$$

$$\alpha_2 = \frac{18024,34 \cdot 0,68}{6,3} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$\alpha_2 = 1945,49 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Lineární součinitel prostupu tepla

Součinitel tepelné vodivosti pro Inconel 690 $\lambda_{I690} = 14 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot \alpha_1 \cdot r_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{I690}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2 \cdot \alpha_1 \cdot r_2}} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (17)$$

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 3040,01 \cdot 5,08 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2 \cdot 14} \cdot \ln \frac{6,35 \cdot 10^{-3}}{5,08 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2 \cdot 1945,49 \cdot 6,35 \cdot 10^{-3}}}$$

$$k_l = 12,37 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Střední logaritmický spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (18)$$

$$\Delta t = \frac{(315,6 - 48,9) - (97,2 - 48,9)}{\ln \frac{315,6 - 48,9}{97,2 - 48,9}} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t = 127,82 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Lineární hustota tepelného toku

$$q_l = k \cdot \pi \cdot \Delta t \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1}\text{]} \quad (19)$$

$$q_l = 12,37 \cdot \pi \cdot 127,82 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1}\text{]}$$

$$q_l = 4967,28 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1}\text{]}$$

Teplota na vnitřní straně stěny trubky

$$t_{d1} = t_{ps} - \frac{q_l}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (20)$$

$$t_{d1} = 206,4 - \frac{4967,28}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{3040,01 \cdot 5,08 \cdot 10^{-3}} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_{d1} = 155,2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Teplota na vnější straně stěny trubky

$$t_{d2} = t_v + \frac{q_l}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (21)$$

$$t_{d2} = 48,9 + \frac{4967,28}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{1945,49 \cdot 6,35 \cdot 10^{-3}} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_{d2} = 112,89 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Celková délka trubek

$$L = \frac{Q}{k \cdot \Delta t} [m] \quad (22)$$

$$L = \frac{32943456}{12,37 \cdot 127,82} [m]$$

$$L = 20835,34 [m]$$

Počet trubek ve svazku

$$N = \frac{L}{l} [1] \quad (23)$$

$$N = \frac{20835,34}{12,1} [m]$$

$$N = 1721,93 [1]$$

Z důvodu velké odchylky vypočtených teplot stěn trubek od teplot předpokládaných provedu opravu iteračním způsobem.

7.3 Iterace

Střední teplota chlazené látky

$$t_{chs2} = \frac{t_{chs1} + t_{d1}}{2} [^{\circ}C] \quad (24)$$

$$t_{chs2} = \frac{206,4 + 155,21}{2} [^{\circ}C]$$

$$t_{chs2} = 180,81 [^{\circ}C]$$

Střední teplota stěny trubky

$$t_{s2} = \frac{t_{chs2} + t_v}{2} [^{\circ}C] \quad (25)$$

$$t_{s2} = \frac{180,81 + 48,9}{2} [^{\circ}C]$$

$$t_{s2} = 114,86 [^{\circ}C]$$

Nusseltovo kritérium

$$Pr(180,81\text{ }^{\circ}C) = 1,01 [1]$$

$$Pr_s(114,86\text{ }^{\circ}C) = 1,51 [1]$$

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} [1] \quad (26)$$

$$Nu = 0,021 \cdot 18119,75^{0,8} \cdot 1,01^{0,43} \cdot \left(\frac{1,01}{1,51}\right)^{0,25} [1]$$

$$Nu = 48,63 [1]$$

Součinitel přestupu tepla

$$\lambda(180,81\text{ }^{\circ}C) = 0,676 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_1} [W \cdot m^{-2} \cdot K] \quad (27)$$

$$\alpha_1 = \frac{48,63 \cdot 0,676}{0,01016} [W \cdot m^{-2} \cdot K]$$

$$\alpha_1 = 3235,62 [W \cdot m^{-2} \cdot K]$$

Teplota filmu vody na vnější straně trubky

$$t_{d2-v} = \frac{t_{d2} + t_v}{2} [^{\circ}C] \quad (28)$$

$$t_{d2-v} = \frac{112,89 + 48,9}{2} [^{\circ}C]$$

$$t_{d2-v} = 80,90 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

Fyzikální vlastnosti vody pro teplotu 80,90 [°C]

$$\lambda = 0,676 \text{ } [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\nu = 0,363 \cdot 10^{-6} \text{ } [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\text{Pr} = 2,19 \text{ } [1]$$

$$\beta = 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ } [\text{K}^{-1}]$$

Grasshofovo kritérium

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (t_{d2} - t_v) \cdot l_s^3}{\nu^2} \text{ } [1] \quad (29)$$

$$Gr = \frac{9,81 \cdot 6,54 \cdot 10^{-4} \cdot (112,89 - 48,9) \cdot 6,3^3}{(0,363 \cdot 10^{-6})^2} \text{ } [1]$$

$$Gr = 7,74 \cdot 10^{14} \text{ } [1]$$

Nusseltovo kritérium

$$Nu = 0,135 \cdot (\text{Pr} \cdot Gr)^{\frac{1}{3}} \text{ } [1] \quad (30)$$

$$Nu = 0,135 \cdot (2,19 \cdot 7,74 \cdot 10^{14})^{\frac{1}{3}} \text{ } [1]$$

$$Nu = 16094,4 \text{ } [1]$$

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l_s} \text{ } [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (31)$$

$$\alpha_2 = \frac{16096,4 \cdot 0,676}{6,3} \text{ } [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\alpha_2 = 1727,17 \text{ } [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Lineární součinitel prostupu tepla

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot \alpha_1 \cdot r_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{I690}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2 \cdot \alpha_1 \cdot r_2}} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (32)$$

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 3235,62 \cdot 5,08 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2 \cdot 14} \cdot \ln \frac{6,35 \cdot 10^{-3}}{5,08 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2 \cdot 1727,17 \cdot 6,35 \cdot 10^{-3}}}$$

$$k_l = 11,91 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Hustota lineárního tepelného toku

$$q_l = k_l \cdot \pi \cdot \Delta t [W \cdot m^{-1}] \quad (33)$$

$$q_l = 11,91 \cdot \pi \cdot 127,82 [W \cdot m^{-1}]$$

$$q_l = 4782,56 [W \cdot m^{-1}]$$

Teplota na vnitřní stěně trubky

$$t'_{d1} = t_{ps} - \frac{q_l}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1} [^{\circ}C] \quad (34)$$

$$t'_{d1} = 206,4 - \frac{4782,56}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{3135,62 \cdot 5,08 \cdot 10^{-3}} [^{\circ}C]$$

$$t'_{d1} = 160,09 [^{\circ}C]$$

Teplota na vnější stěně trubky

$$t'_{d2} = t_v + \frac{q_l}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_2} [^{\circ}C] \quad (35)$$

$$t'_{d2} = 48,9 + \frac{4782,56}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{1727,17 \cdot 6,35 \cdot 10^{-3}} [^{\circ}C]$$

$$t'_{d2} = 118,30 [^{\circ}C]$$

Celková délka trubek

$$L = \frac{Q}{k \cdot \Delta t} [m] \quad (36)$$

$$L = \frac{32943456}{11,91 \cdot 127,82} [m]$$

$$L = 21640,07 [m]$$

Počet trubek ve svazku

$$N = \frac{L}{l} [1] \quad (37)$$

$$N = \frac{21640,07}{12,1} [1]$$

$$N = 1788,46 [1]$$

Vypočtené teploty stěn trubek mají opět velkou odchylku od teplot předchozích, proto provedu druhou úpravu iteračním způsobem.

7.4 Iterace 2

Střední teplota chlazené látky

$$t_{chs3} = \frac{t_{chs2} + t'_{d1}}{2} [^{\circ}C] \quad (38)$$

$$t_{chs3} = \frac{180,81 + 160,09}{2} [^{\circ}C]$$

$$t_{chs3} = 170,45 [^{\circ}C]$$

Střední teplota trubky

$$t_{s3} = \frac{t_{chs3} + t_v}{2} [^{\circ}C] \quad (39)$$

$$t_{s3} = \frac{170,45 + 48,9}{2} [^{\circ}C]$$

$$t_{s3} = 109,68 [^{\circ}C]$$

Nusseltovo kritérium

$$Pr (170,45 \text{ }^{\circ}C) = 1,05 [1]$$

$$Pr_s (109,68 \text{ }^{\circ}C) = 1,59 [1]$$

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25} [1] \quad (40)$$

$$Nu = 0,021 \cdot 18119,75^{0,8} \cdot 1,05^{0,43} \cdot \left(\frac{1,05}{1,59}\right)^{0,25} [1]$$

$$Nu = 49,29 [1]$$

Součinitel přestupu tepla

$$\lambda (170,45 \text{ }^{\circ}C) = 0,679 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_1} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (41)$$

$$\alpha_1 = \frac{49,29 \cdot 0,679}{0,01016} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$\alpha_1 = 3294,09 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Teplota filmu vody na vnější straně trubky

$$t'_{d2-v} = \frac{t'_{d2} + t_v}{2} [^{\circ}C] \quad (42)$$

$$t'_{d2-v} = \frac{118,3 + 48,9}{2} [^{\circ}\text{C}]$$

$$t'_{d2-v} = 83,6 [^{\circ}\text{C}]$$

Fyzikální vlastnosti vody pro teplotu 83,6 [°C]

$$\lambda = 0,677 [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\nu = 0,353 \cdot 10^{-6} [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\text{Pr} = 2,13 [1]$$

$$\beta = 6,6 \cdot 10^{-4} [\text{K}^{-1}]$$

Grasshofovo kritérium

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (t'_{d2} - t_v) \cdot l_s^3}{\nu^2} [1] \quad (43)$$

$$Gr = \frac{9,81 \cdot 6,6 \cdot 10^{-4} \cdot (118,3 - 48,9) \cdot 6,3^3}{(0,353 \cdot 10^{-6})^2} [1]$$

$$Gr = 9,02 \cdot 10^{14} [1]$$

Nusseltovo kritérium

$$Nu = 0,135 \cdot (\text{Pr} \cdot Gr)^{\frac{1}{3}} [1] \quad (44)$$

$$Nu = 0,135 \cdot (2,13 \cdot 9,02 \cdot 10^{14})^{\frac{1}{3}} [1]$$

$$Nu = 16782,73 [1]$$

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l_s} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (45)$$

$$\alpha_2 = \frac{16782,73 \cdot 0,677}{6,3} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\alpha_2 = 1803,48 [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Lineární součinitel prostupu tepla

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot \alpha_1 \cdot r_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{I690}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2 \cdot \alpha_1 \cdot r_2}} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (46)$$

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 3294,09 \cdot 5,08 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2 \cdot 14} \cdot \ln \frac{6,35 \cdot 10^{-3}}{5,08 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2 \cdot 1803,48 \cdot 6,35 \cdot 10^{-3}}}$$

$$k_l = 12,27 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Lineární hustota tepelného toku

$$q_l = k_l \cdot \pi \cdot \Delta t [W \cdot m^{-1}] \quad (47)$$

$$q_l = 12,27 \cdot \pi \cdot 127,82 [W \cdot m^{-1}]$$

$$q_l = 4927,12 [W \cdot m^{-1}]$$

Teplota na vnitřní stěně trubky

$$t''_{d1} = t_{ps} - \frac{q_l}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1} [^{\circ}C] \quad (48)$$

$$t''_{d1} = 206,4 - \frac{4927,12}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{3294,09 \cdot 5,08 \cdot 10^{-3}} [^{\circ}C]$$

$$t''_{d1} = 159,54 [^{\circ}C]$$

Teplota na vnější straně stěny trubky

$$t''_{d2} = t_v + \frac{q_l}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_2} [^{\circ}C] \quad (49)$$

$$t''_{d2} = 48,9 + \frac{4927,12}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{1803,48 \cdot 6,35 \cdot 10^{-3}} [^{\circ}C]$$

$$t''_{d2} = 117,37 [^{\circ}C]$$

Celková délka všech trubek

$$L = \frac{Q}{k \cdot \Delta t} [m] \quad (50)$$

$$L = \frac{32943456}{12,27 \cdot 127,82} [m]$$

$$L = 21005,15 [m]$$

Počet trubek ve svazku

$$N = \frac{L}{l} [1] \quad (51)$$

$$N = \frac{21005,15}{12,1} [1]$$

$$N = 1735,96 [1]$$

Výsledný počet trubek je nižší než zvolený, proto výměník vyhovuje. Vzhledem k tomu, že vypočtená teplota stěn již má minimální odchylku od teplot vypočtených v předchozím kroku, není třeba provádět další úpravu iterací.

8. HYDRAULICKÝ VÝPOČET [6,8,22,25]

Celkové hydraulické ztráty jsou dány součtem všech tlakových ztrát místními odpory a tlakovými ztrátami třením. Výpočet provedu pro nové potrubí a také pro potrubí po delší době provozu.

Průtočná plocha výměníku

$$S = \frac{\pi \cdot d_1^2 \cdot N}{4} [m^2] \quad (52)$$

$$S = \frac{\pi \cdot 0,01016^2 \cdot 1745}{4} [m^2]$$

$$S = 0,14 [m^2]$$

Rychlost proudění v trubce

$$w = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot S} [m \cdot s^{-1}] \quad (53)$$

$$w = \frac{33,52}{858 \cdot 0,14} [m \cdot s^{-1}]$$

$$w = 0,28 [m \cdot s^{-1}]$$

Výpočet Reynoldsova kritéria

$$Re = \frac{w \cdot d_1}{\nu} [1] \quad (54)$$

$$Re = \frac{0,28 \cdot 0,01016}{0,157 \cdot 10^{-6}} [1]$$

$$Re = 18119,75 [1]$$

8.1 Nové potrubí

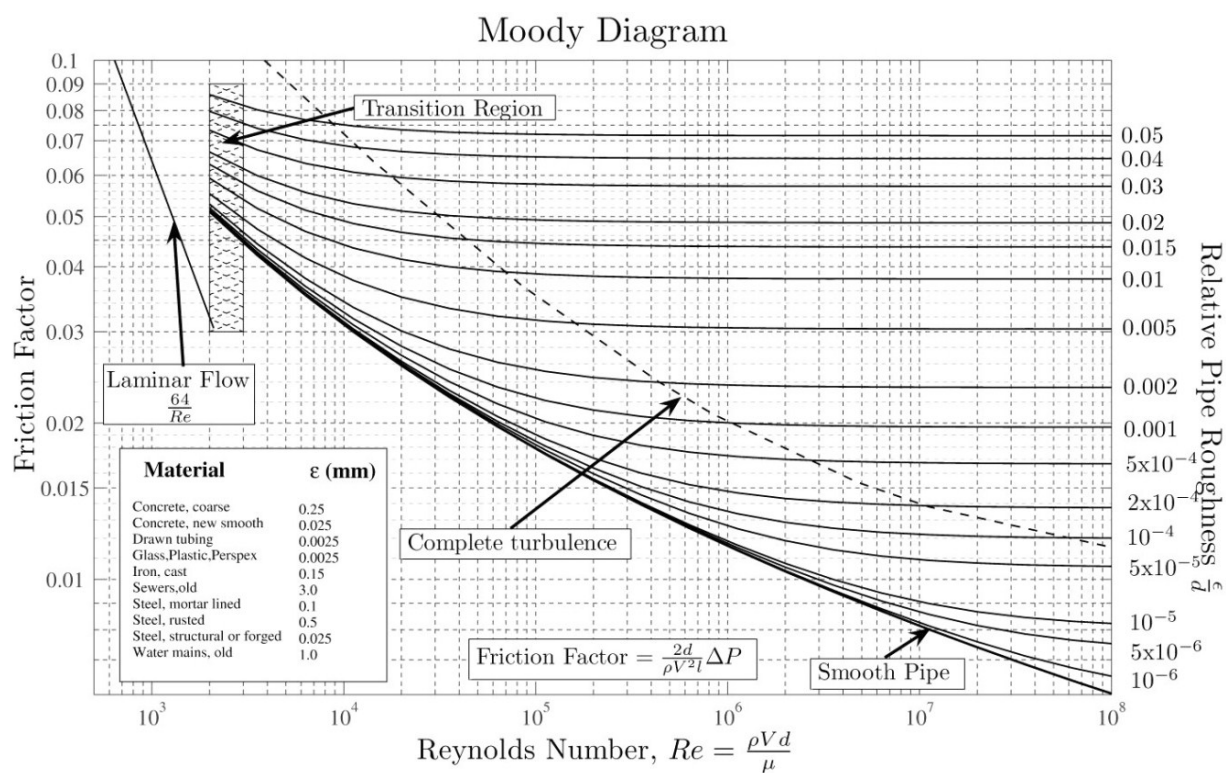
Místní tlaková ztráta při vstupu tekutiny do trubkového svazku

$$\Delta p_{zm1} = \frac{1}{2} \cdot \xi_1 \cdot \rho \cdot w^2 [Pa] \quad (55)$$

$$\Delta p_{zm1} = \frac{1}{2} \cdot 0,7 \cdot 858 \cdot 0,28^2 [Pa]$$

$$\Delta p_{zm1} = 23,54 [Pa]$$

Součinitel tření



Obrázek 8.1 Moodyho diagram [25]

Moodyho diagram slouží k určení součinitele tření v závislosti na Reynoldsově čísle. Diagram je rozdělen na tři části, hydraulicky hladké potrubí, přechodovou oblast a kvadratickou oblast. Součinitel tření se pro každou oblast počítá jiným způsobem, vzorce jsou získány empiricky na základě mnoha měření.

Užijí Nikuradseho vzorec pro turbulentní proudění:

$$\lambda_{t1} = \left(2 \cdot \log \frac{d}{2\Delta} + 1,74 \right)^{-2} [1] \quad (56)$$

$$\lambda_{t1} = \left(2 \cdot \log \frac{10,16}{2 \cdot 0,01} + 1,74 \right)^{-2} [1]$$

$$\lambda_{t1} = 0,02 [1]$$

Místní tlaková ztráta při vstupu tekutiny do trubkového svazku

$$\Delta p_{zm1} = \frac{1}{2} \cdot \xi_1 \cdot \rho \cdot w^2 [Pa] \quad (57)$$

$$\Delta p_{zm1} = \frac{1}{2} \cdot 0,7 \cdot 858 \cdot 0,28^2 [Pa]$$

$$\Delta p_{zm1} = 23,54 [Pa]$$

Tlaková ztráta třením při proudění v první části trubky

$$\Delta p_{zt1} = \frac{1}{2} \cdot \lambda_{t1} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot \frac{l_2}{d} [Pa] \quad (58)$$

$$\Delta p_{zt1} = \frac{1}{2} \cdot 0,02 \cdot 858 \cdot 0,28^2 \cdot \frac{2,9}{0,01016} [Pa]$$

$$\Delta p_{zt1} = 192,0 [Pa]$$

Místní tlaková ztráta v prvním ohybu

$$\Delta p_{zm2} = \frac{1}{2} \cdot \xi_1 \cdot \rho \cdot w^2 [Pa] \quad (59)$$

$$\Delta p_{zm2} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 858 \cdot 0,28^2 [Pa]$$

$$\Delta p_{zm2} = 67,27 [Pa]$$

Tlaková ztráta třením při proudění v druhé části trubky

$$\Delta p_{zt2} = \frac{1}{2} \cdot \lambda_{t1} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot \frac{l_3}{d} [Pa] \quad (60)$$

$$\Delta p_{zt2} = \frac{1}{2} \cdot 0,02 \cdot 858 \cdot 0,28^2 \cdot \frac{6,3}{0,01016} [Pa]$$

$$\Delta p_{zt2} = 417,11 [Pa]$$

Místní tlaková ztráta v druhém ohybu

$$\Delta p_{zm3} = \frac{1}{2} \cdot \xi_1 \cdot \rho \cdot w^2 [Pa] \quad (61)$$

$$\Delta p_{zm3} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 858 \cdot 0,28^2 [Pa]$$

$$\Delta p_{zm3} = 67,27 [Pa]$$

Tlaková ztráta třením při proudění v třetí části trubky

$$\Delta p_{zt3} = \frac{1}{2} \cdot \lambda_{t1} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot \frac{l_2}{d} [Pa] \quad (62)$$

$$\Delta p_{zt3} = \frac{1}{2} \cdot 0,02 \cdot 858 \cdot 0,28^2 \cdot \frac{2,9}{0,01016} [Pa]$$

$$\Delta p_{zt3} = 192,0 [Pa]$$

Místní tlaková ztráta při vstupu tekutiny do trubkového svazku

$$\Delta p_{zm4} = \frac{1}{2} \cdot \xi_1 \cdot \rho \cdot w^2 [Pa] \quad (63)$$

$$\Delta p_{zm4} = \frac{1}{2} \cdot 0,7 \cdot 858 \cdot 0,28^2 [Pa]$$

$$\Delta p_{zm4} = 23,54 [Pa]$$

Celková tlaková ztráta

$$\Delta p_c = \Delta p_{zm1} + \Delta p_{zt1} + \Delta p_{zm2} + \Delta p_{zt2} + \Delta p_{zm3} + \Delta p_{zt3} + \Delta p_{zm4} [Pa] \quad (64)$$

$$\Delta p_c = 23,54 + 192 + 67,27 + 417,11 + 67,27 + 192 + 23,54 [Pa]$$

$$\Delta p_c = 982,73 [Pa]$$

8.2 Potrubí po delším provozu

Místní tlaková ztráta při vstupu tekutiny do trubkového svazku

$$\Delta p_{zm1} = \frac{1}{2} \cdot \xi_1 \cdot \rho \cdot w^2 [Pa] \quad (65)$$

$$\Delta p_{zm1} = \frac{1}{2} \cdot 0,7 \cdot 858 \cdot 0,28^2 [Pa]$$

$$\Delta p_{zm1} = 23,54 [Pa]$$

Součinitel tření

Užiji Nikuradseho vzorec:

$$\lambda_{t2} = \left(2 \cdot \log \frac{d}{2\Delta} + 1,74 \right)^{-2} [1] \quad (66)$$

$$\lambda_{t2} = \left(2 \cdot \log \frac{10,16}{2 \cdot 0,15} + 1,74 \right)^{-2} [1]$$

$$\lambda_{t2} = 0,043 [1]$$

Místní tlaková ztráta při vstupu tekutiny do trubkového svazku

$$\Delta p_{zm1} = \frac{1}{2} \cdot \xi_1 \cdot \rho \cdot w^2 [Pa] \quad (67)$$

$$\Delta p_{zm1} = \frac{1}{2} \cdot 0,7 \cdot 858 \cdot 0,28^2 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_{zm1} = 23,54 \text{ [Pa]}$$

Tlaková ztráta třením při proudění v první části trubky

$$\Delta p_{zt1} = \frac{1}{2} \cdot \lambda_{t2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot \frac{l_2}{d} \text{ [Pa]} \quad (68)$$

$$\Delta p_{zt1} = \frac{1}{2} \cdot 0,043 \cdot 858 \cdot 0,28^2 \cdot \frac{2,9}{0,01016} \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_{zt1} = 412,81 \text{ [Pa]}$$

Místní tlaková ztráta v prvním ohybu

$$\Delta p_{zm2} = \frac{1}{2} \cdot \xi_1 \cdot \rho \cdot w^2 \text{ [Pa]} \quad (69)$$

$$\Delta p_{zm2} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 858 \cdot 0,28^2 \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_{zm2} = 67,27 \text{ [Pa]}$$

Tlaková ztráta třením při proudění v druhé části trubky

$$\Delta p_{zt2} = \frac{1}{2} \cdot \lambda_{t2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot \frac{l_3}{d} \text{ [Pa]} \quad (70)$$

$$\Delta p_{zt2} = \frac{1}{2} \cdot 0,043 \cdot 858 \cdot 0,28^2 \cdot \frac{6,3}{0,01016} \text{ [Pa]}$$

$$\Delta p_{zt2} = 896,79 \text{ [Pa]}$$

Místní tlaková ztráta v druhém ohybu

$$\Delta p_{zm3} = \frac{1}{2} \cdot \xi_1 \cdot \rho \cdot w^2 \text{ [Pa]} \quad (71)$$

$$\Delta p_{zm3} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 858 \cdot 0,28^2 [Pa]$$

$$\Delta p_{zm3} = 67,27 [Pa]$$

Tlaková ztráta třením při proudění v třetí části trubky

$$\Delta p_{zt3} = \frac{1}{2} \cdot \lambda_{t2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot \frac{l_2}{d} [Pa] \quad (72)$$

$$\Delta p_{zt3} = \frac{1}{2} \cdot 0,043 \cdot 858 \cdot 0,28^2 \cdot \frac{2,9}{0,01016} [Pa]$$

$$\Delta p_{zt3} = 412,81 [Pa]$$

Místní tlaková ztráta při vstupu tekutiny do trubkového svazku

$$\Delta p_{zm4} = \frac{1}{2} \cdot \xi_1 \cdot \rho \cdot w^2 [Pa] \quad (73)$$

$$\Delta p_{zm4} = \frac{1}{2} \cdot 0,7 \cdot 858 \cdot 0,28^2 [Pa]$$

$$\Delta p_{zm4} = 23,54 [Pa]$$

Celková tlaková ztráta

$$\Delta p_c = \Delta p_{zm1} + \Delta p_{zt1} + \Delta p_{zm2} + \Delta p_{zt2} + \Delta p_{zm3} + \Delta p_{zt3} + \Delta p_{zm4} [Pa] \quad (74)$$

$$\Delta p_c = 23,54 + 412,81 + 67,27 + 896,79 + 67,27 + 412,81 + 23,54 [Pa]$$

$$\Delta p_c = 1904,03 [Pa]$$

9. PEVNOSTNÍ VÝPOČET [7,11,12,16,19,20]

Jako materiál pro havarijní výměník jsem zvolil Inconel 690. Jedná se o slitinu o vynikajících mechanických a antikorozivních vlastnostech. V současné době nachází uplatnění především v energetice, přednostně v jaderné. Výpočet je proveden dle ČSN 690010. V tabulce 6 je uvedeno jeho chemické složení a v tabulce 7 jsou uvedeny zvolené základní rozměry trubky a výměníku. Trubku jsem zvolil 12,7 x 1,27 mm. Tlak chladicí vody v primárním okruhu je 17,13 MPa.

Tabulka 7 Chemické složení I690

prvek	Normální složení [%]	Složení pro jaderné aplikace [%]
Nikl	Min 58	Min 58
Chrom	27-31	28-31
Železo	7-11	7-11
Uhlík	Max 0,05	Max 0,04
Křemík	Max 0,5	Max 0,5
Mangan	Max 0,5	Max 0,5
Síra	Max 0,015	Max 0,015
Měď	Max 0,5	Max 0,1

Tabulka 8 Zvolené parametry výměníku

Veličina	symbol	hodnota	jednotka
Vnější průměr trubky	d_2	0,0127	[m]
Vnitřní průměr trubky	d_1	0,01016	[m]
Tloušťka stěny trubky	e	0,00127	[m]
Rozteč trubek	t_r	0,381	[m]
Tloušťka trubkovnice	s_{pr}	0,44	[m]
Počet trubek	N	1745	[1]

9.1 Výpočet minimální tloušťky stěny trubky

Dovolené namáhání pro provozní podmínky

$$f = \min \left\{ \frac{R_{e0,2t}}{n_T}; \frac{R_m}{n_B} \right\} [MPa] \quad (75)$$

$$f = \min \left\{ \frac{431}{1,5}; \frac{758}{2,4} \right\} [MPa]$$

$$f = 287,33 [MPa]$$

Minimální tloušťka stěny trubky

$$e = \frac{P \cdot d_1}{2 \cdot f + P} + c [m] \quad (76)$$

$$e = \frac{17,13 \cdot 0,01016}{2 \cdot 307,33 + 17,13} + 0,0005 [m]$$

$$e = 8,76 \cdot 10^{-4} [m]$$

$$e = 0,775 [mm] \text{ vyhovuje}$$

Dovolené namáhání při teplotě zkoušky 20°C

$$f_{20} = \min \left\{ \frac{R_{eHT}}{1,5} \right\} [MPa] \quad (77)$$

$$f_{20} = \min \left\{ \frac{461}{1,5} \right\} [MPa]$$

$$f_{20} = 307,33 [MPa]$$

Dovolené namáhání při výpočtové teplotě

$$f_{TS} = \min \left\{ \frac{R_e}{1,5} \right\} [MPa] \quad (78)$$

$$f_{TS} = \min \left\{ \frac{379}{1,5} \right\} [MPa]$$

$$f_{TS} = 252,66 [MPa]$$

Hydraulická tlaková zkouška

$$P_{test} = 1,25 \cdot PS \cdot \frac{f_{20}}{f_{TS}} [MPa] \quad (79)$$

$$P_{test} = 1,25 \cdot 17,13 \cdot \frac{307,33}{252,66} [MPa]$$

$$P_{test} = 26,05 [MPa]$$

Tloušťka stěny trubky pro hydraulickou tlakovou zkoušku

Přídavek na korozi $c = 0,0005 [m]$

$$e = \frac{P \cdot d_1}{2 \cdot f + P} + c [m] \quad (80)$$

$$e = \frac{26,05 \cdot 0,01016}{2 \cdot 287,33 + 26,05} + 0,0005 [m]$$

$$e = 9,41 \cdot 10^{-4} [m]$$

$$e = 0,941 [mm] \text{ vyhovuje}$$

Tloušťka stěny v ohybu – vnitřní strana

$$e_{int} = e \cdot \frac{\frac{R}{d_2} - 0,25}{\frac{R}{d_2} - 0,5} [m] \quad (81)$$

$$e_{int} = 9,41 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\frac{0,0196}{0,0127} - 0,25}{\frac{0,0196}{0,0127} - 0,5} [m]$$

$$e_{int} = 1,17 \cdot 10^{-3} [m] \text{ vyhovuje}$$

Tloušťka stěny v ohybu – vnější strana

$$e_{ext} = e \cdot \frac{\frac{R}{d_2} + 025}{\frac{R}{d_2} + 0,5} [m] \quad (82)$$
$$e_{int} = 9,41 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\frac{0,0196}{0,0127} + 025}{\frac{0,0196}{0,0127} + 0,5} [m]$$
$$e_{int} = 8,26 \cdot 10^{-4} [m] \text{ vyhovuje}$$

9.2 Pevnostní výpočet trubkovnice

Výpočtový průměr otrubkované plochy

Součinitel rozmístění trubek v trubkovnici Θ pro trubky umístěné do vrcholu čtverce je roven 0.

$$D_R = 2 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{n_R}{\pi \cdot \Theta}} [m] \quad (83)$$

$$D_R = 2 \cdot 3 \cdot 0,0127 \cdot \sqrt{\frac{1736}{\pi \cdot 1}} [m]$$

$$D_R = 1,79 [m]$$

Výpočtová rozteč trubek

$$t_R = t \cdot \sqrt{\frac{n_R}{N \cdot \Theta}} [m] \quad (84)$$

$$t_R = 3 \cdot 0,0127 \cdot \sqrt{\frac{1736}{1745 \cdot 1}} [m]$$

$$t_R = 0,038 [m] \text{ vyhovuje}$$

Součinitele vlivu přetlaku na trubkovnici

$$\eta_1 = 1 - \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d_T}{t_R} \right)^2 [1] \quad (85)$$

$$\eta_1 = 1 - \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{0,0127}{0,038} \right)^2 [1]$$

$$\eta_1 = 0,91 [1]$$

$$\eta_2 = 1 - \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d_T - 2 \cdot s_T}{t_R} \right)^2 [1] \quad (86)$$

$$\eta_2 = 1 - \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{0,0127 - 2 \cdot 0,00127}{0,038} \right)^2 [1]$$

$$\eta_2 = 0,94 [1]$$

Efektivní přetlak

$$p_E = p_2 \cdot \eta_2 - p_1 \cdot \eta_1 [MPa] \quad (87)$$

$$p_E = 0 \cdot 0,94 - 17,13 \cdot 0,91 [MPa]$$

$$p_E = -15,59 [MPa]$$

Tloušťka trubkovnice

$$s_{pr} = 0,41 \cdot D_R \cdot \sqrt{\frac{|p_2 - p_1|}{[\sigma]_P}} [m] \quad (88)$$

$$s_{pr} = 0,41 \cdot 1,79 \cdot \sqrt{\frac{|0 - 17,13|}{283}} [m]$$

$$s_{pr} = 0,18 [m] \text{ vyhovuje}$$

10. ZÁVĚR

V této diplomové práci jsem popsal jednotlivé části jaderné elektrárny Westinghouse AP600, především její pasivní bezpečnostní prvky, které nepotřebují ke svému provozu elektrický proud a fungují jen na principu přírodních fyzikálních zákonů, a jejich funkci popsal na havárii typu LOCA. V další části je stanoven zbytkový tepelný výkon po odstavení reaktoru a v poslední výpočtové části se zabývám základním tepelným, hydraulickým a pevnostním výpočtem pasivního havarijního výměníku tepla.

Výměník se skládá z 1745 trubek vyrobených z materiálu Inconel 690, který má vynikající mechanické a antikorozivní vlastnosti a v současné době nachází stále větší uplatnění především v jaderné energetice. Trubky jsem zvolil o vnějším průměru 12,7 mm, vnitřním průměru 10,16 mm, tloušťce 1,27 mm a délkou střední trubky 12,1 m. Havarijní výměník se uvádí do provozu pouze v případě havárie a musí být schopen zajistit chlazení bez dodávky elektrického proudu. Toho je dosaženo pomocí přirozené cirkulace vlivem rozdílných hustot vody při různých teplotách.

11. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOLAT, P.: Úvod do jaderné energetiky, VŠB TU Ostrava, 2012, 173 s.
- [2] HEJZLAR, R.: Stroje a zařízení jaderných elektráren, ČVUT Praha, 2005, 166 s.
- [3] HABRMAN, P., KUCHAR, L.: Základy jaderné energetiky a bezpečnosti, VŠB TU Ostrava, 1988, 72 s.
- [4] KADLEC, Z.: Průvodce sdílením tepla, Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství / SPBI Spektrum, 2009, 100 s., ISBN 9788073850616
- [5] HEZOUČKÝ, F., KAŇOVSKÝ, P., NAŇO, J.: Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory, ČVUT Praha, 2005, 164 s., ISBN 8001033244
- [6] PAVLOK, B.: Potrubní systémy a armatury, Studijní opora, VŠB TU Ostrava, 2011, 81 s.
- [7] KUČERA, J.: Návrh výměníku havarijního dochlazování jaderné elektrárny AP1000 Westinghouse, Diplomová práce, VŠB TU Ostrava, 2013
- [8] SUCHOMEL, R.: Zásady navrhování projekčních zpracování kotelních ostrovů se zaměřením na potrubí, Diplomová práce, VUT Brno, 2010
- [9] PŘÍHODA, M., RÉDR, M.: Sdílení tepla a proudění, VŠB TU Ostrava, 2008, 177 s., ISBN 2., přeprac. vyd. 20080825
- [10] Dostupné z: <http://www.luzar.cz/web/web-skola/pin/tabulky.pdf>
- [11] Dostupné z: <http://www.corrotherm.co.uk/resources/Inconel690.pdf>
- [12] Dostupné z:
http://new.bibus.cz/pdf/Special_Metals/Nikl/prehled/inconel-alloy_690_706.pdf
- [13] Dostupné z: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0036/ML003691016.html>
- [14] Dostupné z:
<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1793/initial/>

- [15] Dostupné z: <https://aris.iaea.org/sites/..%5CPDF%5CAP-600.pdf>
- [16] Dostupné z:
<http://users.fs.cvut.cz/pavel.hoffman/PREDMETY/ZSVZ/Vypocet%20tlakove%20nadoby%20podle%20CSN%20690010.pdf>
- [17] Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/jaderna-energetika.html>
- [18] Dostupné z: <http://ap1000.westinghousenuclear.cz/>
- [19] Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1411>
- [20] Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1845>
- [21] Dostupné z: <http://www.westinghousenuclear.com/About/History>
- [22] Dostupné z:
http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_04_Hydraulika_potrubi.pdf
- [23] Dostupné z:
http://nuclearstreet.com/nuclear_power_industry_news/b/nuclear_power_news/archive/2009/04/10/nrc-posts-new-steam-generator-tube-inspection-requirements.aspx
- [24] Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/822-jaderna-elektrarna>
- [25] Dostupné z:
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/80/Moody_diagram.jpg
- [26] Dostupné z:
<http://www.transformacni-technologie.cz/tepelna-turbina-a-turbokompresor.html>
- [27] Dostupné z:
<http://www.world-nuclear.org/info/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships/>
- [28] Dostupné z:
<http://ap1000.westinghousenuclear.cz/media/AP1000-Bezpecnost-2011.pdf?PHPSESSID=e%2C4uxQ1q7FTLzrX7bxADq2PrV12>

[29] Dostupné z: <http://blisty.cz/art/63580.html>

[30] Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Westinghouse_Electric_Company

12. PŘÍLOHY

Výkres havarijního výměníku PRHR HX